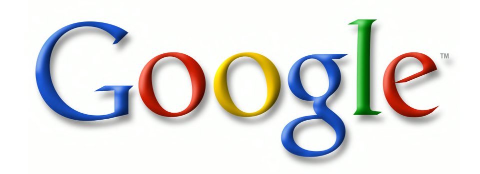




LA

CHALEUR SOLAIRE

et ses

APPLICATIONS INDUSTRIELLES

TOURS. — IMPRIMERIE ERNEST MAZEREAU
11, rue Richelieu, 11

LA
CHALEUR SOLAIRE
ET SES
APPLICATIONS INDUSTRIELLES

PAR

A. MOUCHOT

---

35 Gravures intercalées dans le texte

PARIS
GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE
DE L'ÉCOLE IMPÉRIALE POLYTECHNIQUE, DU BUREAU DES LONGITUDES
55, Quai des Augustins, 55

1869

AVANT-PROPOS

Cet ouvrage traite d'une nouvelle branche d'applications qui peut avoir la plus grande influence sur l'avenir de certaines contrées.

Trouver un moyen pratique de recueillir et d'utiliser directement les rayons solaires au profit de l'agriculture et de l'industrie dans les régions les plus chaudes du globe : tel est le problème que l'auteur s'est proposé de résoudre. En même temps qu'il fait connaître les principes sur lesquels s'appuie la solution qu'il en donne, et les essais tentés dans cette voie depuis l'antiquité jusqu'à nos jours, il expose les résultats de ses propres expériences pendant près de dix années consécutives, résultats qu'il croit décisifs.

Ces expériences datent de 1860; l'auteur s'en est assuré la priorité par un brevet pris le 4 mars 1861, sous le n° 48,622; mais, comme il ne voulait pas faire de ce brevet un objet de spéculation, il a pu l'abandonner dès l'année 1862, lors de l'accueil favorable que reçurent à l'atelier impérial de Meudon ses premiers essais.

S. M. l'Empereur qui, par ses encouragements et

son illustre exemple, donne une impulsion si vive aux recherches scientifiques, a daigné s'intéresser ainsi, presque à leur début, aux nouvelles applications de la chaleur solaire. L'auteur eut été dans l'impossibilité de mener ses expériences à bonne fin sans la haute sollicitude dont il a été l'objet dans cette circonstance. Puissent les efforts qu'il a faits pour essayer de s'en rendre digne, et les résultats importants qu'il croit avoir obtenus, témoigner à la fois de sa reconnaissance et de l'utilité des applications qu'il propose!

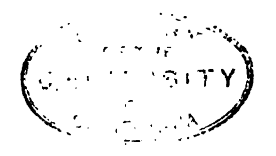
L'auteur saisit en même temps cette occasion de proclamer les nombreuses marques de bienveillance qu'il a reçues de M. le commandant de Verchère de Reffye, directeur de l'atelier d'études de Meudon. Il s'empresse également de remercier de leur concours amical, ou de leurs bons avis, MM. Jules Mariette et Victor Jacquot, attachés au même établissement; M. Coquet, chef-dessinateur de la compagnie d'Orléans; M. Maillot, préparateur à l'École normale supérieure, à l'obligeance duquel il doit d'utiles renseignements historiques; enfin, la plupart des professeurs de sciences avec qui ses fonctions l'ont mis successivement en rapport.

A diverses reprises, les journaux se sont occupés des nouveaux essais relatifs à l'emploi de la chaleur solaire. Dans la séance du 17 septembre 1864, M. Faye, membre de l'Institut, ayant bien voulu rappeler, à propos d'une communication de M. Ba-

binet, une expérience que l'auteur avait faite sous ses yeux dans le courant de 1861, plusieurs journaux parlèrent avantageusement de ce premier essai; ce fut un encouragement pour l'auteur, qui s'occupait activement alors de la construction de chaudières solaires. Plus tard, quand vers la fin de 1868, la nouvelle arriva que le célèbre ingénieur Ericsson venait d'inventer, aux États-Unis, des machines solaires à vapeur et à air chaud, la réclamation de l'auteur fut encore favorablement accueillie par la plupart des grands journaux de Paris. Enfin, lorsque par les soins de S. E. M. le Ministre de l'instruction publique, les résultats des essais relatifs aux applications de la chaleur solaire furent soumis à l'Institut, MM. les rédacteurs des Revues scientifiques se montrèrent presque tous favorables aux vues de l'auteur. Qu'il lui soit donc permis de remercier de leurs encouragements ces défenseurs éclairés de la cause du progrès.

A. MOUCHOT,
Professeur au Lycée de Tours.

Tours, 2 juin 1869.



CHALEUR SOLAIRE

CHAPITRE PREMIER

SOMMAIRE. — Le soleil est une source calorifique des plus intenses; preuve expérimentale. — Rôle de la chaleur solaire à la surface du globe; elle y entretient le mouvement et la vie. — Transformation de la chaleur en travail; équivalent mécanique de la chaleur. — La chaleur solaire est la source des seuls travaux naturels que l'homme ait su jusqu'à présent recueillir. — Possibilité d'emmagasiner directement le travail de la chaleur solaire; avantages qui doivent en résulter pour certaines contrées. — Nouveau récepteur solaire; sur quels principes en est fondée la théorie; moyen facile et peu coûteux de produire assez vite au soleil une température élevée sur une surface de chauffe indéfinie. — Plan de l'ouvrage.

Les observations les plus récentes, malgré les précieux indices qu'elles ont fournis relativement à la constitution du soleil, sont encore loin de suffire pour fixer à cet égard l'opinion des savants. Cependant si Deluc a pu, vers la fin du dernier siècle, soutenir avec quelque apparence de raison que les rayons solaires ne sont pas chauds par eux-mêmes et n'engendrent la chaleur qu'en atteignant les parties les plus basses de la surface terrestre, on ne doute plus aujourd'hui que la température du soleil ne soit fort élevée. Voici d'ailleurs un des faits qui viennent à l'appui de cette opinion. Lorsqu'on reçoit derrière une vitre les rayons solaires on en ressent la chaleur à peu près comme à l'air libre. Or, les vitres présentent la singulière propriété d'intercepter presque totalement la chaleur obscure et même celle d'un feu de bois ordinaire, tandis qu'elles se laissent instantanément traverser par les rayons émanant

d'une source calorifique intense, telle que le fer en fusion. L'analogie nous conduit donc à assimiler la température du soleil à celle de nos plus ardentes fournaises. Si l'on observe en outre que par suite de son prodigieux éloignement ce vaste foyer n'envoie à la terre que des rayons extrêmement affaiblis, on ne peut que s'étonner de la puissance d'une source calorifique capable de produire à une pareille distance de semblables effets.

A une époque comme la nôtre, où les progrès de la physique ont déjà permis, non-seulement d'évaluer avec exactitude l'intensité de la radiation solaire à la surface du globe, mais encore d'apprécier mieux que jamais le rôle de la chaleur dans les machines, il était naturel d'examiner s'il ne serait pas possible aux habitants de certaines contrées d'emmagasiner au profit de leur industrie les rayons du soleil et de se ménager cette ressource gratuite au moyen de récepteurs aussi faciles à construire que peu dispendieux. Telle est la question que nous nous proposons de traiter dans cet ouvrage en faisant connaître à la fois les détails qu'il nous a été donné de recueillir à ce sujet et les résultats de nos propres expériences. Nous espérons prouver de la sorte que, si l'inégale transparence du verre pour les rayons calorifiques d'espèces différentes a déjà permis de concentrer la chaleur solaire sous des châssis vitrés, on peut, moyennant quelques modifications apportées à un appareil aussi simple, attendre du soleil des services fort importants dans les régions privilégiées où le ciel reste longtemps pur. Pour plus de clarté, nous commencerons par un examen rapide du rôle de la chaleur solaire à la surface du globe.

La terre n'est, à vrai dire, qu'une vaste serre chaude

relativement aux espaces célestes. L'air qui l'environne de toutes parts forme autour d'elle une atmosphère transparente analogue à une immense cloison vitrée ; car il est prouvé que ce gaz se comporte comme le verre à l'égard des rayons calorifiques, c'est-à-dire qu'il livre immédiatement passage à la chaleur du soleil en même temps qu'il s'oppose au rayonnement du sol. Cependant, cette enveloppe aérienne évidemment destinée à protéger sur la terre l'existence des êtres organisés, ne suffirait pas seule à remplir une pareille tâche. En effet, une atmosphère d'une extrême pureté, tout en affaiblissant dans une certaine mesure la radiation solaire ne saurait en modérer convenablement l'ardeur. De plus, elle ne préserverait la surface terrestre du refroidissement qu'à la condition de rester immobile et comme stagnante. Or, ce calme absolu de l'atmosphère est incompatible avec les effets de l'insolation ; car, les couches d'air inférieures en s'échauffant au contact du sol dans les contrées équatoriales tendent sans cesse à s'élever pour aller retomber au loin dans les régions les plus froides, tandis que l'air moins dilaté et par conséquent plus lourd de ces dernières régions s'écoule vers la zone torride afin d'y combler les vides qui s'y forment ; d'où résultent pour l'équilibre atmosphérique des perturbations continuelles, cause immédiate des vents. Ainsi, la trop grande pureté de l'air présenterait le double inconvénient de n'empêcher ni l'extrême chaleur du jour, ni le froid glacial des nuits : de là des conditions excessivement défavorables à l'existence des êtres organisés. Il fallait pour combattre cés influences pernicieuses l'intervention d'un voile toujours prêt à se déployer ou à disparaître suivant le besoin. C'est alors que l'eau dut commencer à

remplir le rôle important qu'elle joue dans l'économie du globe. On serait tenté de croire au premier abord qu'entre ce liquide et l'air le plus pur la ligne de démarcation est des mieux tranchées ; il n'en est rien cependant. L'air, sans même avoir besoin de changer d'état, se dissout constamment dans l'eau pour y entretenir la vie, et l'eau se mélange pareillement à l'air en s'y répandant sous forme de vapeur. Or, la seule présence de la vapeur d'eau dans l'atmosphère suffit pour maintenir entre des limites convenables les variations thermométriques de la surface terrestre. En effet, lors même qu'elle reste invisible, cette vapeur diminue déjà la transparence de l'air pour la chaleur au point de rendre tolérables et l'ardeur du soleil et le rayonnement nocturne du sol. Mais c'est particulièrement quand le froid la condense en nuages qu'elle exerce avec énergie cette double influence. Car, d'un côté les nuages renvoient à la terre la chaleur qu'ils en reçoivent, et de l'autre ils interceptent la radiation solaire jusqu'à ce qu'elle les fasse repasser à l'état de vapeur invisible, ou que le froid les précipite sur la terre. Disons de plus que, tout en mettant le sol à l'abri des grands écarts de température, l'humidité de l'air est indispensable à l'existence des animaux et des plantes dont les organes se dessécheraient dans une atmosphère privée de vapeur d'eau. L'ensemble des phénomènes qui concourent à produire ces résultats importants contitue d'ailleurs une des harmonies les plus admirables de la nature, puisqu'il faut alors que l'eau réduite en vapeurs par les rayons du soleil s'élève dans l'air en vertu de sa légèreté relative ; qu'elle s'y condense en nuages par l'effet du refroidissement ; puis, qu'elle retombe sur la terre à l'état de pluie ou de neige, et qu'elle

retourne enfin par les artères fluviales au sein des lacs et des mers pour y reprendre bientôt le cours de ses pérégrinations.

En résumé, les mouvements de l'atmosphère et la circulation de l'eau dans cette enveloppe gazeuse sont, aussi bien que les phénomènes électriques résultant de pareilles vicissitudes, l'œuvre du soleil. Toutefois, ce n'est là qu'une des phases de la lutte engagée entre cet astre et la pesanteur. Car, si cette dernière enchaîne en quelque sorte les corps pondérables à la surface de la terre, le soleil en les dilatant les soustrait à sa puissance et tend sans cesse à les mettre en mouvement. On peut même dire qu'à l'exception des marées, produites en grande partie par la lune, et de quelques autres phénomènes dus à la chaleur centrale du globe, tout déplacement observé sur la terre est un résultat de l'influence du soleil. Mais, sans parler ici des courants superficiels ou sous-marins que cet astre produit dans l'Océan, du magnétisme qu'il développe dans l'écorce du globe ou des changements qu'il apporte à la structure des montagnes dont les glaciers déchirent les sommets et dont les fleuves charrient les débris jusqu'au fond des mers, bornons-nous à rappeler comment par une transformation suprême il entretient le mouvement des animaux.

Les rayons solaires ne versent pas seulement sur notre globe la lumière et la chaleur, ils y répandent encore des influences chimiques sans lesquelles les êtres organisés ne pourraient que s'étioler et mourir. On sait, en effet, que loin du soleil les végétaux perdent la faculté de décomposer les aliments qu'ils puisent dans l'air ou dans le sol et de s'assimiler par suite les principes nécessaires à

leur accroissement. Quant aux animaux, s'ils ne semblent pas tout d'abord dépendre au même degré de la radiation solaire, ils ont besoin pour atteindre leur développement complet d'en subir de temps à autre les salutaires influences. D'ailleurs, ils ne pourraient sans elle prolonger longtemps leur existence ici-bas, et la raison en est que : semblables aux machines mues par le feu, ils exhalent constamment dans l'air, en guise de fumée, un gaz qui finirait par les asphixier si les plantes ne le décomposaient sans relâche sous l'action directe du soleil. Les animaux ont, en effet, pour fonction spéciale de se mouvoir, et, comme toute machine thermique, ils n'arrivent à produire le mouvement qu'en brûlant du combustible. Aussi, leur nourriture est-elle exclusivement organique et le carbone y entre-t-il pour une large part : ce carbone est porté par la digestion dans leurs veines où il se consume lentement en dégageant plus ou moins de chaleur ; puis, il est exhalé dans l'acte de la respiration sous forme de gaz acide carbonique, gaz impropre à l'entretien de la vie animale, et que les végétaux décomposent sous l'influence des rayons solaires, afin de s'en approprier le carbone et de mettre en liberté l'oxygène, principe de la combustion. Les végétaux à leur tour deviennent la nourriture des animaux herbivores ; ceux-ci, la proie des carnivores ; et c'est ainsi que le soleil fait circuler comme dans un tourbillon la vie à la surface du globe. On peut donc caractériser sa double influence sur les êtres organisés, en disant qu'elle a pour but d'emmagasiner le combustible dans les végétaux et de permettre aux animaux de convertir ce combustible en mouvement. Il est bon d'ajouter toutefois que le carbone absorbé par les végétaux n'est pas exclusivement affecté à la

nourriture du règne animal, et qu'il sert encore à constituer le bois dont la combustion nous préserve des rigueurs de l'hiver en nous restituant sous une autre forme la chaleur bienfaisante du soleil. Rappelons enfin que l'homme a su joindre à cette provision de combustible une nouvelle richesse destinée à alimenter longtemps son industrie, en allant chercher dans les mines de houille les débris de la végétation luxuriante qui l'a précédé sur la terre.

Tel est l'ensemble des principales influences dont nous avons cru devoir retracer le tableau, afin de rendre plus intelligibles les considérations où nous allons entrer.

Les propriétés si diverses qu'on vient de reconnaître aux rayons solaires n'ont pas médiocrement contribué à modifier les vues des physiciens sur la chaleur, la lumière et l'électricité. Depuis Newton, la tendance générale était de regarder ces agents impondérables comme des fluides distincts. Mais on a fini par n'y voir, conformément à l'opinion de Descartes, que des mouvements particuliers imprimés à l'éther, fluide éminemment subtil, qui remplit l'espace en pénétrant tous les corps. Comme d'ailleurs toute matière en mouvement représente un certain travail, ou, en d'autres termes, équivaut à l'élévation verticale d'un poids à une hauteur déterminée, on a été naturellement conduit à chercher l'équivalent mécanique des diverses vibrations de l'éther. Or, l'une des plus belles conquêtes de notre époque est d'avoir résolu ce problème pour la chaleur ; car on sait maintenant que le travail correspondant à une élévation de température d'un degré produite dans un kilogramme d'eau est de 425 kilogrammètres environ, ou qu'il suffirait pour soulever à la hauteur d'un mètre un poids de 425 kilogrammes.

Mais, s'il est vrai que toute chaleur puisse être convertie en travail, il est à présumer que le soleil offre sous ce rapport dans les contrées méridionales de grandes ressources à l'agriculture et à l'industrie. Cette conjecture semble, au reste, d'autant plus rationnelle que déjà la chaleur solaire est pour ainsi dire la source des seuls travaux naturels que l'homme ait su jusqu'à présent détourner à son profit. On ne peut guère, en effet, compter parmi ces travaux que ceux qui résultent de l'emploi du combustible, des moteurs animés, des cours d'eau et du vent. Or, comme on vient de le voir et comme le fait si bien observer sir John Herschel dans son Traité d'astronomie, « ce sont les rayons du soleil qui donnent naissance aux vents ; ce sont encore eux qui forcent les eaux de la mer à circuler en vapeur, à arroser les continents et à produire les sources et les rivières ; c'est enfin par leur action vivifiante que sont élaborés au sein de la matière inorganique les végétaux qui alimentent les animaux et l'homme, et constituent les strates charbonneux où celui-ci a su trouver un immense dépôt de force vive. » On le voit donc, sous quelque forme qu'elle emprunte le concours des agents naturels, l'industrie humaine ne relève que du soleil. Ajoutons qu'elle est encore loin de recueillir la majeure partie du travail engendré sur la terre par cet immense foyer. Mais, si, comme l'expérience l'a depuis longtemps établi, la chaleur reçue en très-peu de temps par une surface de médiocre étendue soumise à l'insolation est considérable ; si, de plus, il est facile de préserver cette surface du refroidissement et de lui conserver sur le milieu qui l'environne un excès de température de plusieurs centaines de degrés, il est clair qu'on peut se proposer d'emmagasiner directement

le travail de la chaleur solaire et d'accroître ainsi d'une manière notable la portion de ce travail qu'utilise déjà l'homme. On comprend d'ailleurs toute l'importance d'une pareille conquête pour les régions où le soleil est ardent et l'atmosphère longtemps pure; car, c'est le plus souvent dans ces régions que l'énergie des moteurs animés, les cours d'eau et le combustible font défaut : comme si la nature les avait dotées d'une provision suffisante de travail en les inondant de chaleur. A peine est-il besoin d'ajouter que, si les rayons solaires peuvent constituer, pour certains climats, une ressource précieuse au point de vue des applications mécaniques, il en sera certainement de même pour les besoins ordinaires de la vie.

Notre but, ainsi que nous l'avons déjà dit, étant de prouver qu'il est possible de construire à peu de frais une sorte de réservoir où s'accumule la chaleur solaire comme l'eau d'un courant dans un barrage, nous allons d'abord donner une idée des principes sur lesquels repose la théorie de l'appareil; après quoi, nous réunirons dans quelques chapitres les détails historiques et surtout les données expérimentales relatives à cette même question.

Tout corps bon conducteur offrant une grande surface de chauffe, ou plutôt d'insolation, sous une épaisseur assez faible, peut rapidement atteindre au soleil une température supérieure à celle de l'eau bouillante. Cette assertion paraît d'abord s'accorder assez mal avec ce qui se passe habituellement sous nos yeux : car, si l'on prend, par exemple, une feuille mince et large d'un corps bon conducteur, tel que le cuivre ; qu'on la recouvre d'une couche de noir de fumée afin d'en augmenter le pouvoir absorbant, et qu'on la présente aux rayons solaires de manière à ce

qu'elle les reçoive d'à-plomb, on trouve que, si la température de ce corps s'élève assez vite en commençant, elle finit par rester stationnaire à un degré notablement inférieur au point d'ébullition de l'eau. Mais, cette dernière circonstance est due à ce que la feuille de cuivre ne conserve pas toute la chaleur qu'elle absorbe, et qu'elle en perd la plus grande partie par suite de son rayonnement vers les espaces célestes et de son contact avec l'air ou certains corps qui lui servent d'appui. Ce qui le prouve, c'est qu'il suffit de supprimer une à une les causes de refroidissement que nous venons de signaler pour voir la température du métal s'élever progressivement et dépasser cent degrés. A cet effet on commence par isoler la feuille métallique en l'appuyant sur un corps mauvais conducteur, tel que le sable, le plâtre en poudre, etc., ou mieux en la plaçant au fond d'une caisse ouverte à sa partie supérieure et construite en bois blanc. Cela fait, comme l'air en contact avec la feuille de cuivre devient plus léger à mesure qu'il s'échauffe, et monte sans cesse pour faire place à l'air froid, on doit encore, en vue de combattre cette cause de déperdition de chaleur, entraver autant que possible le mouvement ascensionnel du gaz, sans trop affaiblir l'intensité des rayons incidents. On y réussit à merveille en recouvrant la caisse d'une lame de verre mince et bien transparente. Car cette lame, tout en s'opposant au renouvellement de la couche d'air voisine du métal se laisse instantanément traverser par la chaleur solaire. Mais là ne se borne pas, comme on sait, l'heureuse influence du verre en cette circonstance, et ce corps si facilement perméable aux rayons du soleil refuse au contraire de livrer immédiatement passage à la chaleur émise par le métal noirci et

ne la transmet que lentement à l'air extérieur par voie de conductibilité. En d'autres termes, la caisse munie de sa paroi vitrée devient une sorte de barrage où les rayons calorifiques pénètrent sans difficulté tant qu'ils proviennent d'une source de chaleur aussi intense que le soleil, mais ne trouvent en quelque sorte plus d'issue, à cause de la faible conductibilité du verre, dès qu'ils se sont transformés en rayons obscurs. Il est bon d'ajouter que, d'après ce qu'on a dit plus haut, l'air à son tour peut servir à protéger la paroi vitrée contre le refroidissement, et que si l'on couvre la caisse d'un châssis formé de deux lames de verre interceptant entre elles une couche d'air épaisse d'environ deux centimètres, on accroît l'intensité de la chaleur qui s'y trouve concentrée. Ces précautions suffisent déjà pour qu'un thermomètre placé dans la caissse atteigne et dépasse à la longue cent degrés. Mais, les effets sont beaucoup plus rapides et plus intenses dès qu'on fait converger de nouveaux rayons sur la feuille de cuivre à l'aide d'un réflecteur ou miroir métallique : car il est facile d'obtenir par ce moyen des températures de 200° et au delà. Inutile de faire observer que nous parlons ici, non pas de ces phénomènes curieux qui résultent de la concentration des rayons solaires sur un seul point, mais d'effets calorifiques dus à la répartition à peu près uniforme de ces rayons dans un corps d'une certaine étendue, ce qui est d'une toute autre importance pour l'industrie.

Comment les propriétés remarquables que nous venons de mentionner ont-elles été découvertes ? Quelle est la somme de chaleur et par conséquent de travail qui, dans chaque lieu, tombe par minute et par mètre carré sur une surface normalement exposée aux rayons du soleil ? Par

quel moyen est-il possible d'accroître sur cette même surface l'intensité de la radiation solaire? Quels sont enfin depuis l'antiquité jusqu'à nos jours les essais tentés en vue d'utiliser cette source féconde de chaleur? Telles sont les questions auxquelles nous allons essayer de répondre. Nous exposerons d'abord le résumé des recherches entreprises au sujet de la transparence des vitres pour la chaleur par Mariotte, Dufay, de Saussure, Ducarla, les deux Herschel et Melloni. Puis, nous ferons connaître les résultats trouvés par sir John Herschel et Pouillet en mesurant l'intensité de la radiation solaire à la surface du sol. Nous rappellerons ensuite les propriétés des réflecteurs et les effets les plus remarquables obtenus au moyen de ces appareils. Enfin, nous parlerons de nos propres expériences et nous terminerons cet ouvrage par l'histoire des applications mécaniques de la chaleur solaire.

CHAPITRE II

SOMMAIRE. — De l'usage des vitres chez les anciens. — Concentration de la chaleur solaire dans une enceinte vitrée. — Les Arabes se servaient de vases de verre pour opérer certaines distillations au soleil. — Expériences de de Saussure, de Ducarla. — La chaleur du soleil est, comme sa lumière, formée d'une infinité de rayons d'espèces différentes. — Les lames incolores de verre se comportent avec la chaleur comme les vitraux colorés avec la lumière; expériences qui ont conduit à ces conclusions. — Résultats des observations de Melloni et de sir John Herschel. — Influence sur la transmission calorifique de la nature de la substance, de l'épaisseur des plaques, de la source de chaleur, etc. — Outre les rayons lumineux et calorifiques, le spectre solaire renferme des rayons chimiques.

La concentration de la chaleur solaire dans une enceinte vitrée est un fait expérimental si facile à constater, que l'observation en a dû suivre d'assez près l'invention des vitres. Il est donc probable que le mérite de cette observation revient aux Egyptiens, qui excellèrent de bonne heure dans l'art de travailler le verre, d'en varier les couleurs, et d'en former ces lames minces si propres à défendre les appartements contre les intempéries de l'air, tout en y laissant pénétrer la lumière et la chaleur du soleil.

Boudet, membre de l'Institut d'Egypte, nous apprend en effet, dans son Mémoire sur l'art de la verrerie, que, suivant Strabon et d'autres historiens, on fabriquait de temps immémorial en Egypte, surtout dans les verreries de la grande Diospolis, des verres très-beaux, très-transparents, et même des verres dont les couleurs étaient celles du rubis, du saphir, ... etc. Il ajoute que les Egyptiens imaginèrent les premiers d'enchâsser le verre dans les voûtes des temples et des bains publics ou particuliers afin d'en éclairer l'intérieur, et que cet usage fut

ensuite transmis aux Grecs et aux Romains, lorsque le verre devenu un produit considérable des manufactures égyptiennes leur parvint par la voie du commerce. « Les anciens, continue-t-il, garnissaient ordinairement les fenêtres de leurs maisons, ou les litières de leurs dames, avec des feuilles d'une pierre transparente qu'ils nommaient spéculaire, et qui, vraisemblablement, était du mica à grandes lames semblable à celui qui, sous le nom de verre de Moscovie, remplace le véritable verre non-seulement dans ce pays, mais encore sur les vaisseaux de guerre, où nos carreaux de vitres ordinaires seraient bientôt brisés par l'explosion de l'artillerie. Mais, il n'en est pas moins prouvé, comme nous l'avons dit en parlant des voûtes vitrées des bains et des temples, que les riches avaient des carreaux de véritable verre, même aux fenêtres des serres dans lesquelles ils gardaient les plantes délicates qu'ils voulaient comme eux-mêmes garantir de l'intempérie de l'atmosphère. »

Avant Boudet, le célèbre Winckelmann avait déjà revendiqué pour les anciens l'honneur d'avoir inventé les vitres. Mais, certains critiques, trop prévenus en faveur des modernes, n'eurent garde de se ranger à son opinion. De là des discussions qui dureraient probablement encore, si les fouilles de Pompeï n'étaient venues clore le débat en prouvant l'existence chez les Romains de vitres ayant à peu près la même composition que les nôtres. Ajoutons, puisque nous avons dû remonter jusqu'à l'origine du verre, que, lors de la conquête de l'Egypte par les Mahométans, l'art de la verrerie était encore florissant dans ce pays et que les savants Arabes en profitèrent pour donner un nouvel essor à la chimie créée par les prêtres de Thèbes

et de Memphis. On croit en outre que ce fut pendant la captivité de Saint-Louis en Egypte que les croisés apprirent à travailler le verre : en sorte que les plus pauvres d'entre eux, au retour de leurs lointains voyages, purent se faire concéder le privilége de cette industrie pour rétablir leur fortune. Mais ce serait nous écarter de notre sujet que d'entrer dans de plus longs détails à cet égard. Aussi, nous bornerons-nous à dire que les Arabes avaient reconnu l'efficacité d'un vase de verre mince pour concentrer la chaleur solaire dans certaines liqueurs et qu'ils se servaient exclusivement d'alambics de verre pour leurs distillations au soleil. Les premiers chimistes ou plutôt les alchimistes de l'Occident suivirent sur ce point l'exemple des Arabes, comme on en pourra juger plus loin par les essais de Lonicer, de Libavius, etc. Enfin, on verra dans l'histoire des applications mécaniques de la chaleur solaire que vers le milieu du dix-septième siècle, Kicher et Milliet-Dechales se servaient de matras en verre mince pour échauffer au soleil l'air confiné dans une enceinte obscure. Voici maintenant ce qu'écrivait un siècle plus tard de Saussure (1740-1799), le célébre naturaliste génevois.

« C'est un fait connu, et sans doute depuis longtemps, qu'une chambre, un carosse, une couche, sont plus fortement réchauffés par le soleil, lorsque ses rayons passent au travers de verres ou de châssis fermés, que quand ces mêmes rayons entrent dans les mêmes lieux ouverts et dénués de vitrages ; on sait même que la chaleur est plus grande dans les chambres dont les fenêtres ont un double châssis.

« Lorsque je réfléchis pour la première fois à ces faits si connus, je fus bien étonné qu'aucun physicien n'eût cher-

ché à voir jusqu'où pourrait aller cette augmentation ou cette concentration de la chaleur...

« Pour faire donc cette expérience alors nouvelle, j'ai fait faire en mars 1767 cinq caisses rectangulaires de verre blanc de Bohême, chacune desquelles est la moitié d'un cube coupé parallèlement à sa base ; la première a un pied de largeur en tous sens, sur six pouces de hauteur ; la seconde dix pouces sur cinq, et ainsi de suite jusqu'à la cinquième qui a deux pouces sur un. Toutes ces caisses sont ouvertes par le bas et s'emboîtent les unes dans les autres sur une table fort épaisse de poirier noirci, à laquelle elles sont fixées. J'emploie sept thermomètres à cette expérience, l'un suspendu en l'air et parfaitement isolé à côté des boîtes et à la même distance du sol ; un autre placé sur la caisse extérieure en dehors de cette caisse, et à peu près au milieu ; le suivant posé de même sur la seconde caisse, et ainsi des autres jusqu'au dernier qui est sous la cinquième caisse et à demi noyé dans le bois de la table.

« Il faut observer que tous ces thermomètres sont de mercure, et que tous, excepté le dernier, ont la boule nue, et ne sont pas engagés, comme les thermomètres ordinaires, dans une planche ou dans une boîte, dont le plus ou le moins d'aptitude à prendre ou à conserver la chaleur fait entièrement varier les résultats des expériences.

« Tout cet appareil exposé au soleil, dans un lieu découvert, par exemple, sur le mur de clôture d'une grande terrasse : je trouve que le thermomètre suspendu à l'air libre monte le moins haut de tous ; que celui qui est sur la caisse extérieure monte un peu plus haut ; ensuite celui qui est sur la seconde caisse, et ainsi des autres, en observant cependant que le thermomètre qui est placé sur la

cinquième caisse monte plus haut que celui qui était sous elle à demi noyé dans le bois de la table. J'ai vu celui-là monter jusqu'à 70 degrés de Réaumur (87°, 5 cent.). Les fruits exposés à cette chaleur s'y cuisent et rendent leur jus.

« Quand cet appareil est exposé au soleil dès le matin, on observe communément la plus grande chaleur vers les deux heures et demie après midi; et lorsqu'on le retire des rayons du soleil, il emploie plusieurs heures à son entier refroidissement.....

« Je soupçonnai que j'obtiendrais une plus grande chaleur en renfermant plus exactement l'espace dans lequel je voulais concentrer la chaleur, et en présentant toujours mes verres perpendiculairement aux rayons du soleil. Comme je voulais faire des expériences comparatives entre la plaine et les hautes montagnes, j'étais obligé de donner un très-petit volume à ma machine, pour la rendre légère et peu embarrassante. Je fis donc faire une caisse en sapin, d'un pied de longueur sur neuf pouces de largeur et de profondeur hors d'œuvre; cette caisse, d'un demi-pouce d'épaisseur, était doublée intérieurement d'un liége noir, épais d'un pouce. J'avais choisi cette écorce comme une matière légère et en même temps très-coerçante ou très-peu perméable à la chaleur. Trois glaces entrant à coulisse dans l'épaisseur du liége, et placées à un pouce et demi de distance l'une de l'autre, fermaient cette boîte, de manière que les rayons du soleil ne pouvaient parvenir au fond de la boîte qu'après avoir traversé les trois glaces.

« Pour que le soleil frappât toujours perpendiculairement ces glaces, qu'il fît par cela même la plus grande impression sur elles et souffrît le moins de réflexions possible,

j'avais soin, dans mes expériences, de faire suivre à ma caisse le mouvement du soleil, en la retournant régulièrement toutes les vingt minutes, en sorte que le soleil éclairât exactement la totalité du fond de la caisse. La plus grande chaleur que j'aie obtenu par ce moyen a été de 87°,7 R. (109°,6 c.), c'est-à-dire de près de 8° R. (10° c.) au-dessus de l'eau bouillante.

« Mais comme je m'aperçus que ma caisse perdait de la chaleur parce qu'elle s'échauffait sensiblement à l'extérieur, j'essayai de la placer au milieu d'une autre caisse, beaucoup plus grande, remplie de bourre, de laine, et ouverte seulement du côté du soleil. Avec cette précaution, la chaleur monta jusqu'à 88° R. (110° c.), quoique le temps fût moins favorable ; en sorte que j'ai lieu de croire que, dans des circonstances plus heureuses, elle serait montée à 90° ou 95° R.

« Enfin, pour supprimer totalement le refroidissement extérieur, je fis faire un poêle de fer blanc, fermé d'un côté par une glace bien transparente. Je plaçai mon instrument dans ce poêle, je l'exposai au soleil, en ayant soin, comme je l'ai dit plus haut, que les rayons de cet astre entrassent toujours perpendiculairement dans la boîte. Alors à mesure que la chaleur du soleil faisait monter les thermomètres renfermés dans ma boîte, je réchauffais graduellement le poêle, afin que la boîte eût toujours par dehors une chaleur qui ne fût que de peu de degrés inférieure à celle que le soleil lui imprimait par dedans. Malgré ces soins le soleil ne put jamais faire monter le thermomètre au-dessus de 128° R. (160° c.)

« On me demandera peut-être pourquoi je n'ai pas essayé de multiplier mes verres. Je répondrai que je ne les

ai pas multipliés parce que je me suis convaincu, par un nombre d'expériences comparatives faites dans des circonstances où je mettais toute la parité qui était en mon pouvoir, que trois glaces ne donnaient pas plus de chaleur que deux ; et, dans mon premier appareil, composé de cinq caisses emboîtées les unes dans les autres, j'avais aussi vu très-clairement que je n'avais pas plus de chaleur avec cinq caisses qu'avec quatre, et même avec trois. Mais ce qui peut induire en erreur dans ces expériences, c'est que si l'on met plusieurs verres les uns sur les autres et des thermomètres dans chaque intervalle, la chaleur paraît plus grande dans ceux qui sont les plus près du fond de la boîte, quoique le plus haut degré, celui du thermomètre qui est au fond, ne soit pas plus élevé lorsqu'il y a quatre ou cinq verres, que lorsqu'il y en a seulement deux, au moins lorsque ces verres sont des glaces de deux ou trois lignes d'épaisseur. Je crois cependant que si l'on augmentait au delà d'un certain terme le nombre des verres, alors ce point le plus chaud se trouverait non plus au fond de la caisse, mais dans quelqu'un des verres intermédiaires. Là serait le maximum et la chaleur décroîtrait en haut et en bas à mesure que l'on s'éloignerait de ce point...

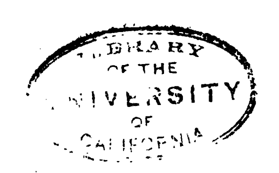
« Sans décider si les rayons du soleil sont eux-mêmes du feu, ou s'ils ne font qu'imprimer au feu contenu dans les corps un degré de mouvement que produit la chaleur, c'est un fait qu'il les réchauffent. C'est un fait tout aussi certain que, quand le corps sur lequel ils agissent est exposé en plein air, la chaleur dont ils le pénètrent lui est en grande partie dérobée par les courants qui règnent dans l'air, et par ceux que cette chaleur produit elle-même. Mais si ce corps est situé de manière à recevoir ces rayons

sans être accessible à l'air, il conserve une plus grande portion de la chaleur qui lui est imprimée. Une seule glace ne suffit pas pour préśérver l'intérieur d'une caisse du refroidissement produit ainsi par l'air qui circule ainsi autour d'elle. Il faut deux ou plusieurs glaces, suivant leur épaisseur, leur distance et la grandeur de la caisse. Mais je n'ai pas cru que leur multiplication pût augmenter indéfiniment l'intensité de la chaleur, premièrement, parce que la raison me semblait indiquer que dès qu'il y avait assez de verres pour que la somme de leurs forces coerçantes ou conservatrices de la chaleur égalât celle des parois de la caisse leur multiplication devenait absolument inutile. Enfin, ce qui achevait de me démontrer qu'il ne saurait être avantageux de multiplier les verres, je ne dis pas seulement à l'infini, mais pas même au delà de quatre ou cinq, c'est la considération de la déperdition considérable que souffre la lumière par la réflexion, la dispersion et l'absorption de ses rayons à chaque verre qu'elle traverse... Je pensais donc que le meilleur moyen d'augmenter la chaleur dans cette expérience aurait été d'augmenter la grandeur de la caisse, parce que la déperdition se faisant par les surfaces, on aurait eu sous un plus grand volume une déperdition proportionnellement moins grande. Si en même temps on avait augmenté la force coerçante des parois de la caisse, peut-être alors aurait-on pu avec avantage employer un ou deux verres de plus, et c'est ce que je me proposais d'essayer.

« Quant aux applications, je m'en suis occupé. Comme je ne me flattais pas de fondre des métaux, je ne pensai qu'à faire servir cette invention à des usages qui ne demandent qu'une chaleur peu supérieure à celle de l'eau

bouillante. Je voulais aussi éviter l'assujétissement et la perte de temps qu'entraîne la nécessité de présenter toujours la caisse au soleil à mesure que sa position change. Dans cette intention, j'ai essayé d'employer des calottes de verre hémisphériques qui s'emboîtaient les unes dans les autres; la plus grande avait douze pouces six lignes de diamètre, la seconde dix pouces deux lignes, et la troisième huit pouces trois lignes. Les ayant posées sur une table d'ardoise recouverte de sable bien sec, à la hauteur d'un pouce, je trouvai que le thermomètre montait dans cet appareil à 70° R, comme dans mes caisses; ce qui me fit voir qu'on ne pouvait pas même se flatter de faire cuire la soupe dans cet appareil. Je ne désespérais cependant pas qu'on pût tirer quelque utilité de la chaleur solaire concentrée par le moyen des verres plans, et je pensais même à quelques nouvelles tentatives, mais seulement pour des distillations, des décoctions, ou, en général pour des opérations qui ne demandaient pas un degré de chaleur fort supérieur à celui de l'eau bouillante. En attendant cet instrument peu volumineux, peu coûteux, facile à exécuter, qu'on aurait aisément rendu comparable, m'avait paru propre à une infinité d'expériences curieuses et intéressantes, et je lui avais donné le nom d'héliothermomètre ou de thermomètre solaire, comme devant servir à mesurer la vraie somme de chaleur que le soleil peut exciter en différentes circonstances. »

Les passages qu'on vient de lire sont extraits de deux lettres de de Saussure, adressées l'une à Buffon, l'autre au *Journal de Paris*. La seconde de ces lettres, en même temps qu'elle faisait connaître dans leur ensemble les essais de l'auteur, avait pour but de combattre sur plusieurs



points les vues du physicien français Ducarla (1738-1816), homme de mérite qui, tout en donnant une théorie prématurée et par conséquent défectueuse des appareils de de Saussure, venait d'indiquer de notables perfectionnements à y apporter.

Ducarla soutenait que si l'élévation de température n'était pas plus grande sous les caisses de verre superposées, c'était parce que la chaleur était bue par les supports à mesure qu'elle se concentrait dans l'appareil. Il essaya donc d'isoler d'une manière plus complète cet appareil en formant les supports eux-mêmes d'enveloppes alternées de verre et d'air. De plus, il plaça sous la dernière caisse un réservoir massif, noirci extérieurement et destiné « à tasser le feu solaire, » selon ses propres expressions. Enfin, il eut soin de munir son appareil d'une sorte de housse ou d'écran qui devait le couvrir la nuit ou les jours de pluie afin d'y conserver la chaleur acquise pendant l'insolation. Grâce à ces perfectionnements, il espérait avec raison obtenir des températures plus élevées que celles qu'avait observées de Saussure. Mais en se laissant guider par un calcul fondé sur des hypothèses inexactes, il crut pouvoir admettre que plus on emploierait de caisses de verre superposées, plus on concentrerait de chaleur dans l'appareil. Aussi fut-il amené de la sorte à des conclusions inadmissibles et que dut combattre de Saussure.

Voici la première figure que, dans son *Traité du feu complet*, Ducarla donne de son appareil, abstraction faite de l'écran.

Sept cloches de verre superposées interceptent entre elles des couches d'air épaisses de 3 lignes et reposent sur un tronc de cône à bases parallèles E A B D E, lequel est

solide, creux, mince et noirci. Dans l'intérieur de ce tronc

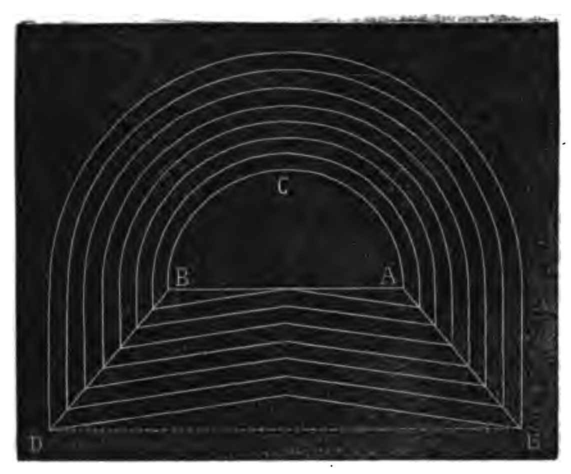


Fig. 1.

de cône sont fixées des calottes de verre, de forme conique, espacées entre elles comme les cloches ; enfin, sur la base supérieure repose un hémisphère ACBA de même rayon qu'elle, massif, noir, réfractaire et dense. Cet hémisphère est le réservoir où doit se concentrer la chaleur.

Ducarla se flattait, en exposant au soleil un appareil de ce genre, formé d'un nombre considérable de boçaux, et en le recouvrant de son écran pendant la nuit ou les temps sombres, « d'entasser et de conserver le feu solaire pour fondre telles et autant de matières qu'on voudrait, fût-ce après un mois de pluie, » et il engageait l'industrie métallurgique à construire des fourneaux sur ce modèle. Hâtons-nous d'ajouter qu'il ne semble pas s'être mis en peine de contrôler sa théorie par l'expérience puisque dans une réplique à de Saussure, il dit à ce propos : « Je crois

pouvoir répondre théoriquement du succès. La chose paraît digne de vérification. » Il parle cependant d'un essai où il put constater une élévation progressive de température, sinon jusqu'au réservoir massif, du moins jusqu'au delà de la douzième cloche ; mais, il en conclut que la chaleur n'avait pas eu le temps de cheminer jusqu'au centre de l'appareil, et n'en persista pas moins dans sa manière de voir.

Nous ne suivrons Ducarla ni dans l'exposé de sa théorie, ni dans les écarts où il fut entraîné faute de s'être laissé guider par l'expérience. Disons seulement qu'il eut encore un mérite, sur lequel nous reviendrons plus loin, celui de joindre à son appareil des miroirs ou réflecteurs : car, bien qu'il ne propose ce perfectionnement que dans le cas irréalisable où les cloches voisines du réservoir deviendraient incandescentes, et qu'il n'y attache même guère d'importance, puisqu'il ajoute : « Ce moyen également puissant, incommode et coûteux, sera peu mis en usage : il vaut mieux employer son argent à multiplier les bocaux, » on doit lui tenir compte d'une idée qui devait plus tard amener de bons résultats. Pour être juste il faut pourtant reconnaître que Milliet Dechales avait eu déjà cette idée avant lui.

En résumé, l'addition de miroirs à l'un des appareils de de Saussure, l'installation d'un réservoir noirci sous la dernière cloche et les précautions prises pour l'isoler à l'aide de corps mauvais conducteurs, sont de notables progrès réalisés par Ducarla dans la question qui nous occupe. Quant à la cause de la concentration de la chaleur solaire dans l'appareil, l'état des sciences physiques à cette époque ne permettait pas encore de la découvrir ; Ducarla

croyait, mais à tort, la trouver dans la différence de densité du réservoir et des enveloppes successives de verre et d'air. « Tout mon secret, disait-il, consiste dans l'alternative d'un fluide très-rare avec des matières très-denses formant un tout isolé. » De là les conclusions étranges auxquelles il fut conduit.

De Saussure lui-même n'entrevoyait qu'une partie de la vérité, en jugeant que si la paroi vitrée de l'héliothermomètre concentre les rayons solaires, c'est uniquement parce qu'elle s'oppose au refroidissement produit par le contact de l'air extérieur, et non point par quelque action particulière du verre sur la lumière, ou plutôt sur la chaleur. Il avait pourtant observé que les rayons brillants émanés d'une source calorifique assez faible ne produisaient pas dans son appareil le même effet que les rayons solaires. Car, en présentant la caisse à un bon feu de bois allumé au foyer de sa cheminée, il trouva précisément l'inverse de ce qui avait lieu au soleil, c'est-à-dire que le verre extérieur était le plus chaud de tous, et que les autres avaient une température d'autant moindre qu'ils étaient plus près du fond de la caisse. Il y avait au reste déjà plus de cent ans que le physicien français Mariotte (mort en 1684) avait conclu d'une expérience analogue que la lumière et la chaleur ne se comportent pas toujours de la même manière, par rapport à une lame de verre mince. Mais les observations de ce genre n'étaient encore ni assez nombreuses, ni assez variées pour permettre d'expliquer convenablement l'influence du verre en pareil cas. Il était indispensable pour cela de pénétrer plus avant qu'on ne l'avait fait jusqu'alors dans l'étude des propriétés de la chaleur, et de constater entre cet agent et la lumière une harmonie des plus inti-

mes. On avait, à la vérité, reconnu déjà quelques analogies entre les rayons calorifiques et les rayons lumineux. Ainsi, de Saussure et Pictet (1752-1825) avaient prouvé que la chaleur obscure se concentre comme la lumière au foyer d'un miroir métallique. Mais certains faits, tels que la décomposition de la lumière blanche en rayons de couleurs différentes, la transparence ou l'opacité des corps réduits en lames minces pour ces rayons élémentaires n'avaient pas jusque-là leurs analogues dans la théorie de la chaleur. Or, les expériences en se multipliant finirent par montrer que, soit dans sa constitution, soit dans la manière dont elle se comporte avec les corps réduits en lames minces, la chaleur présente les mêmes particularités que la lumière, et, chose remarquable, ce fut précisément l'observation de Mariotte qui, loin d'établir une dissemblance entre les deux agents, devint le premier indice de cette analogie nouvelle, en ce qu'elle fit voir que le verre est transparent pour les rayons calorifiques émanés du soleil et à peu près opaque pour ceux d'un feu de bois ordinaire. Malgré l'intérêt qu'offre l'histoire de tant d'ingénieuses recherches, nous ne pouvons en donner ici qu'un résumé rapide, où seront consignés toutefois les résultats les plus utiles à recueillir pour les applications de la chaleur solaire.

La première expérience connue dans cet ordre de faits est, comme nous venons de le dire, celle de Mariotte : elle date de 1682. Voici comment ce grand physicien la rapporte dans son *Traité des couleurs* :

« Il faut remarquer ici que la lumière et la chaleur du soleil passent avec une égale facilité à travers le verre et les autres corps transparents, ce qu'on peut observer en mettant une glace de verre sur un petit miroir concave de

métal exposé au soleil; car il fera un semblable effet à peu près dans son foyer pour mettre le feu, comme s'il n'y avait point de verre, et la différence sera seulement d'environ une cinquième partie, qui est à peu près ce que la lumière perd par les réflexions qui se font sur les surfaces du verre en passant et repassant. Mais il n'en est pas de même de la chaleur du feu et de sa lumière, car sa lumière passe facilement à travers le verre, et sa chaleur n'y passe point, ou bien il y en passe très-peu, vous en pourrez faire l'expérience en cette sorte.

« Servez-vous du même petit miroir concave et le tenez à deux ou trois pieds de distance d'un assez grand feu, faites réfléchir sa lumière sur quelque endroit de votre main, de manière qu'elle s'y réunisse, vous sentirez une chaleur telle que vous ne la pourrez souffrir que très-peu de temps; couvrez ensuite votre miroir avec la même glace qui aura servi pour le soleil, et recevez de même sur votre main la lumière du feu réunie, elle vous paraîtra presque aussi claire que quand le verre n'y est pas, mais vous ne sentirez aucune chaleur, et quand même vous approcheriez le miroir à un pied de distance du feu, il ne fera aucun effet sensible de chaleur, quoique la lumière réunie soit alors plus claire que quand le miroir est éloigné de deux ou trois pieds du feu, le verre étant ôté. »

Dufay (1698-1739), comme on le peut voir par les Mémoires de l'Académie pour 1726, refit cette expérience d'une autre manière, en joignant de nouvelles observations à celles de Mariotte. Ayant disposé vis-à-vis l'un de l'autre deux miroirs concaves, de façon à ce que les rayons émis par un charbon ardent placé au foyer de l'un vinssent se réunir au foyer de l'autre pour y brûler des matières in-

flammables, il reconnut que l'interposition d'une lame de verre entre les deux foyers diminuait assez notablement l'effet produit, et que d'ailleurs l'épaisseur de la lame exerçait dans ce cas peu d'influence.

« J'ai placé, dit-il, entre mes deux miroirs éloignés l'un de l'autre de 18 pieds (5^m,8) une glace plane des deux côtés ; cela a tellement diminué la chaleur qu'il m'a fallu pour pouvoir brûler au foyer du second les rapprocher d'environ 8 pieds (2^m,6), ce qui est près de la moitié de la distance à laquelle ils brûlent sans l'interposition de la glace. Je n'ai pas remarqué qu'il arrivât de différence sensible soit que j'approchasse la glace de l'un des deux miroirs, ou qu'elle fût placée à égale distance de l'un ou de l'autre.

« J'ai remarqué que la diminution de la force des rayons n'est pas à beaucoup près en raison des épaisseurs des glaces qu'ils traversent; car, une glace très-mince fait une diminution fort considérable, et une dont l'épaisseur était double de la première ne m'a obligé de rapprocher le miroir que de très-peu de chose : ainsi, c'est principalement à l'entrée des rayons dans le verre que se fait la plus grande perte. »

Deux savants célèbres, le suédois Schéele (1742-1786), dans son *Traité chimique de l'air et du feu*, et le français Lambert (1728-1777), dans sa *Pyrométrie*, s'occupèrent plus tard d'essais du même genre. Mais, tandis que le second de ces observateurs étudiait l'extinction calorifique au moyen de vitres superposées, le premier crut pouvoir affirmer qu'en interposant une lame de verre entre un miroir et le feu, on n'avait pas la moindre chaleur au foyer de ce miroir. Pictet, pour combattre cette assertion, n'eut

qu'à recommencer l'expérience de Dufay, et fit voir que, malgré l'interposition d'une lame de verre entre les foyers de deux miroirs conjugués, la chaleur d'une bougie ou même d'un vase plein d'eau bouillante, en rayonnant du foyer du premier miroir à celui du second, y produisait encore un effet sensible quoique très-faible.

Ainsi, la seule conclusion légitime à tirer des expériences que nous venons de mentionner, c'était qu'une lame de verre mince ne se laisse pas traverser avec une égale facilité par tous les rayons calorifiques. A la rigueur, on pouvait déjà comparer l'action du verre en cette circonstance à celle d'une vitre colorée sur la lumière. Mais selon toute probabilité cette comparaison n'eût pas encore paru suffisamment justifiée par l'expérience. Avant de l'établir, il fallait l'étayer sur des observations nombreuses que nous allons rappeler brièvement. Examinons d'abord comment la décomposition de la lumière en rayons de couleurs diverses put servir de guide aux physiciens dans l'étude des propriétés de la chaleur.

Quand la lumière du soleil pénètre par une petite ouverture circulaire A dans une chambre obscure, elle y forme un faisceau rectiligne qui va se projeter sur le mur

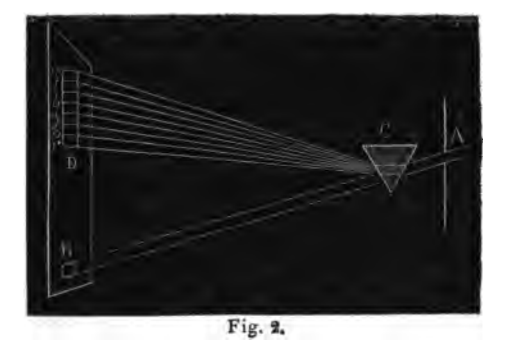


Fig. 2.

opposé suivant un disque brillant B. Mais, si l'on fait traverser au faisceau le prisme triangulaire de cristal C, le disque brillant se déplace et s'allonge en formant un spectre solaire D, c'est-à-dire une bande lumineuse dont les nuances transversales, variées à l'infini, viennent se fondre en sept teintes principales, le rouge, l'orangé, le jaune, le vert, le bleu, l'indigo et le violet. La diversité de ces nuances prouve immédiatement que le faisceau de lumière a été décomposé par le prisme en une infinité de rayons d'espèces différentes, puisque des rayons identiques ne sauraient en pareil cas affecter différemment notre œil. La nuance n'est d'ailleurs pas le seul caractère qui permette de distinguer les uns des autres les rayons élémentaires du faisceau lumineux. En effet, tous ces rayons sont réfractés par le prisme à des degrés différents : en d'autres termes, ils sortent du cristal plus au moins déviés de leur direction primitive ; d'où il suit que, la déviation croissant d'une manière continue du rouge au violet, chaque rayon peut, indépendamment de sa nuance, être parfaitement caractérisé par la réfraction qu'il subit. Ce nouveau caractère, en quelque sorte superflu quand il s'agit des rayons lumineux, puisque notre œil peut en apprécier les moindres différences, devient un précieux moyen d'investigation pour qui veut étudier la constitution de la chaleur. Car, s'il est vrai que cet agent présente une grande analogie avec la lumière, il est, comme elle, décomposable en une infinité de rayons inégalement réfrangibles, et ces rayons diversement répartis dans le spectre solaire, doivent y occasionner au moins de légères différences de température. En un mot, pour reconnaître si la chaleur du soleil est ou n'est pas homogène, il suffira de consulter un thermomètre

très-sensible successivement promené dans les diverses teintes du spectre.

Buffon (1707-1788) paraît avoir eu le premier l'idée de cette expérience, à en juger par ce passage d'un mémoire lu par lui à l'Académie des sciences en 1747 : « Les rayons jaunes, dit-il, sont ceux qui ébranlent le plus fortement la rétine et qui brûlent le plus violemment, comme je crois m'en être assuré en réunissant au moyen d'un verre lenticulaire une quantité de rayons jaunes qui m'étaient fournis par un grand prisme, et en comparant leur action, avec une égale quantité de rayons de toute autre couleur, réunis par le même verre lenticulaire et fournis par le même prisme. »

S'il ne se fut pas servi dans cette circonstance d'une lentille inégalement perméable à tous les rayons calorifiques du faisceau lumineux, Buffon n'eût pas manqué de reconnaître que la chaleur va constamment en croissant du violet au rouge dans le spectre solaire. Mais cette vérité ne fut démontrée qu'en 1775 par le physicien français Rochon (1741-1817) qui trouva de plus que la chaleur des rayons rouges vaut environ 8 fois celle des rayons violets. La question en était là, vers 1800, lorsque W. Herschel (1738-1822) lui fit faire un pas considérable. En promenant un thermomètre fort sensible dans le spectre solaire, il reconnut que la chaleur allait non-seulement en croissant du violet au rouge, mais encore qu'elle atteignait son maximum un peu au-delà de cette dernière teinte, c'est-à-dire dans une région privée de lumière. Il était donc prouvé par là que le soleil nous envoie des radiations obscures assujéties aux lois de la réfraction comme les rayons brillants et que d'ailleurs la chaleur de cet astre se compose

aussi bien que sa lumière d'une infinité de rayons d'espèces différentes.

Le célèbre astronome anglais avait été amené par une question d'optique à s'occuper de ce genre de recherches. Ayant reconnu la nécessité d'éteindre en partie les rayons lumineux et calorifiques qui formaient dans son grand télescope une image trop vive du soleil, il essaya pour y parvenir d'interposer entre cette image et l'œil des lames transparentes de diverses substances, et vit avec surprise que certaines plaques fortement colorées laissaient passer presque toute la chaleur, tandis que d'autres plaques beaucoup plus diaphanes présentaient le phénomène inverse. Il n'en fallut pas davantage pour lui faire conjecturer que la chaleur est formée comme la lumière de rayons d'espèces différentes et que les corps réduits en lames minces sont doués à des degrés divers de la transparence calorifique. Afin de s'en assurer, il était nécessaire d'observer le passage instantané de la chaleur à travers un grand nombre de plaques de diverse nature. W. Herschel se mit à l'œuvre et, malgré l'insuffisance des indications du thermomètre dans des recherches aussi délicates, il parvint à démontrer, 1° qu'en général il n'existe aucun rapport entre la transparence des corps pour la lumière et la faculté qu'ils possèdent de transmettre la chaleur rayonnante ; 2° que la nature de la source calorifique influe sur le nombre des rayons transmis à travers un même écran.

Cependant, la doctrine de la transmission calorifique, ou du passage instantané de la chaleur à travers les lames minces, ne laissa pas que de rencontrer au début de nombreux contradicteurs. On prétendit que la chaleur était simplement absorbée par celle des faces de l'écran qui

regardait la source, puis, qu'elle se propageait de couche en couche à travers cet écran jusqu'à l'autre face pour rayonner de là sur le thermomètre. B. Prévost (1755-1819) combattit le premier cette manière de voir en prouvant à l'aide d'une expérience des plus ingénieuses que la chaleur rayonnante traverse instantanément un filet d'eau coulant sous la forme d'une nappe très-mince. Delaroche (vers 1811) fit observer ensuite que si la chaleur qui vient de traverser une lame de verre dépend à la fois de la conductibilité de cette lame et de sa transparence pour les rayons calorifiques, l'effet produit sur le thermomètre doit diminuer lorsqu'on supprime cette transparence en noircissant à l'encre de Chine celle des faces de l'écran qui est tournée vers la source. L'expérience étant venue confirmer pleinement sa prévision, il ne fut dès lors plus guère permis de révoquer en doute la transmission de la chaleur à travers certains corps solides. Ce même physicien reconnut aussi par des méthodes, plus exactes que celles de ses prédécesseurs, 1° qu'une lame de verre ordinaire est plus ou moins transparente pour les rayons calorifiques selon la température de la source qui les émet; 2° que la chaleur qui vient de traverser une lame de verre éprouve une déperdition beaucoup moindre en passant à travers une seconde lame identique à la première : d'où il était facile de conclure que la chaleur est en quelque sorte tamisée par une vitre incolore, comme la lumière l'est par des vitraux colorés. Mais c'est principalement à Melloni (1801-1854) que revient l'honneur d'avoir dissipé tous les doutes relativement à la transmission calorifique, soit en agrandissant le domaine des recherches entreprises par ses devanciers, soit en apportant dans ses expériences une précision inconnue avant lui.

Il est juste de reconnaître d'ailleurs que ce grand physicien fut bien servi par les circonstances et qu'il dut une partie de ses succès à une découverte remarquable dont un de ses amis venait d'enrichir la science. En effet, pour aborder les expériences délicates qui firent sa gloire, il avait besoin d'un appareil beaucoup plus sensible que le thermomètre ordinaire ; et ce fut Nobili, son maître, qui, vers 1830, le tira d'embarras en inventant comme à point nommé le thermo-multiplicateur. Grâce à l'exquise sensibilité de cet instrument dans lequel la moindre élévation de température produit des effets très-appréciables, et dont il est inutile de donner ici la description, Melloni put démontrer de la manière la plus rigoureuse l'existence de la transmission calorifique en distinguant à des signes certains les effets dus à cette transmission de ceux que produit la chaleur propre de l'écran. Il fut alors prouvé que la chaleur reçue par certains corps réduits en lames ou en couches très-minces se fractionne en trois parts, dont la première est réfléchie et la seconde absorbée par ces corps, tandis que la troisième les traverse instantanément sans modifier en rien leur température. Cette dernière particularité conduisit Melloni à diviser les corps solides liquides ou gazeux en deux classes, suivant leur transparence ou leur opacité pour la chaleur, il appela les premiers diathermanes, les seconds athermanes, puis, il se mit à étudier la transmission calorifique à travers diverses espèces de solides ou des liquides et des gaz renfermés entre des lames de verre parallèles. Il put ainsi consigner dans des tables fort étendues l'influence sur cette transmission soit de la nature des substances, soit de l'épaisseur de l'écran, soit enfin de la température de la source calorifique. On doit seulement re-

gretter que Melloni ait exclusivement opéré, dans ses expériences, sur les rayons émis par le platine incandescent, les lampes de Locatelli et d'Argant, ou des vases de cuivre noirci chauffés tantôt à 100 et tantôt à 400 degrés ; en comprenant les rayons solaires parmi ces différentes sources il eût pu fournir des indications précieuses pour la question qui nous occupe. Parmi les lois qu'il sut découvrir ou confirmer nous n'avons d'ailleurs besoin que de rappeler les suivantes, qui se rapportent plus ou moins directement à notre sujet :

1° La quantité de chaleur transmise par un écran diminue quand l'épaisseur de l'écran augmente.

En effet, Melloni a trouvé que sur 1,000 rayons émis par une lampe d'Argant, il en passait respectivement 619, 576, 558, 549, à travers des lames d'un beau verre dont les épaisseurs étaient entre elles comme les nombres 1, 2, 3, 4, celle de la première étant 2^{mm},068.

On voit de plus par ces résultats que la chaleur absorbée par l'écran est loin d'être proportionnelle à son épaisseur, et que si l'on partage par la pensée la lame la plus épaisse en 4 tranches égales à la première lame, l'absorption de la chaleur est plus grande pour la première tranche que pour la seconde, et ainsi de suite. Ce fait reçoit au reste une nouvelle confirmation de la loi suivante.

2° La chaleur rayonnante qui vient de traverser une première lame de verre est absorbée en moindre proportion quand elle en traverse une seconde, une troisième, etc...

Pour le prouver, Melloni prit quatre lames du même verre, ayant une épaisseur commune de 2^{mm},068 ; puis, il forma successivement l'écran d'une, deux, trois, quatre de

ces lames, et trouva que, sur 1,000 rayons incidents, les rayons transmis étaient respectivement au nombre de 619, 531, 485, 450. D'où il était facile de conclure que la chaleur absorbée par chaque lame allait en diminuant de la première à la dernière. C'est particulièrement ici qu'on doit regretter de ne pas voir figurer les rayons solaires parmi les sources de chaleur employées par Melloni ; mais, pour combler en partie cette lacune, il suffit d'invoquer une expérience que sir John Herschel rapporte ainsi dans son *Traité d'astronomie* :

« Au moyen de mesures directes prises avec l'actinomètre, instrument que j'ai longtemps employé à ce genre de recherches, et qui n'offre aucune des chances d'erreur auxquelles on est exposé en suivant d'autres méthodes, je trouvai que sur 1,000 rayons solaires calorifiques, 816 pénètrent une plaque de verre épaisse de 0,12 de pouce (3^{mm},04); et que, sur 1,000 rayons qui ont traversé une semblable plaque, 859 peuvent en traverser une autre. »

Quand même le verre dont il s'agit dans cette expérience ne serait pas du verre ordinaire, il est permis de conclure de là qu'un châssis formé de deux vitres parallèles, épaisses chacune de 3^{mm}, n'absorbe guère que les 0,3 de la chaleur incidente ; en sorte qu'il en reste 0,7 à transformer en travail.

3° La nature de la substance influe sur la transmission calorifique.

Ainsi, l'air et les gaz sont éminemment diathermanes ; les liquides le sont à des degrés divers ; enfin, parmi les corps solides, la plupart de ceux qui sont transparents pour la lumière le sont aussi pour la chaleur. Cependant il peut se faire que des substances opaques pour la lu-

mière soient transparentes pour la chaleur, et réciproquement. Melloni trouve, par exemple, en opérant sur des solides réduits en lames minces de 2^{mm},62 d'épaisseur que, sur 100 rayons émis par la lampe d'Argant, le sel gemme en transmet 92; le verre à glace, 62; le cristal de roche enfumé, 57 ; l'alun diaphane, 12, etc.

La composition du verre influe, en particulier, sur sa transmission calorifique. Ainsi, des plaques d'une épaisseur commune de 1^{mm},88, sur 100 rayons incidents, en laissent passer :

Flint anglais.	65
Flint français.	64
Autre espèce.	64
Verre de glace.	62
Autre espèce.	60
Autre espèce.	59
Crown français.	58
Verre à vitres.	54
Autre espèce.	52
Autre espèce.	50
Crown anglais.	49

Enfin la quantité de chaleur rayonnante qui traverse un verre coloré est toujours inférieure à celle que transmet un verre blanc de même épaisseur : comme on peut le voir par le tableau suivant, où, sur 100 rayons incidents, des verres de 1^{mm},85 d'épaisseur en laissent passer :

Violet foncé.	53
Rouge vif.	47
Orangé.	44
Jaune.	34

Bleu foncé. 33
Vert pomme. 26
Vert minéral. 23
Bleu très-foncé. 19

Il faut d'ailleurs conclure de ces derniers résultats que la matière colorante du verre influe par sa nature sur la transmission calorifique, puisque le nombre des rayons transmis par chaque lame n'est pas en rapport avec la température de la teinte correspondante du spectre solaire.

Melloni reconnut encore qu'une lame de verre ou de cuivre noircie à la lampe ne se laisse pas traverser par la chaleur.

4° La faculté que possède la chaleur de rayonner à travers les substances diathermanes diminue rapidement avec la température de la source. Le sel gemme fait seul exception à cette loi.

NOMS des SUBSTANCES.	TRANSMISSION SUR 100 RAYONS PROVENANT DE			
	LAMPE de Locatelli.	PLATINE incandescent.	CUIVRE à 400°.	CUIVRE à 100°.
Sel gemme . .	92	92	92	92
Verre de glace.	39	24	6	0
Autre espèce .	38	26	5	0
Alun.	9	2	0	0
Glace pure. . .	6	0	0	0

C'est ce qui résulte du tableau qui précède, où l'épaisseur commune des plaques est de $2^{mm},6$.

Voici de plus un second tableau où l'on peut constater que, pour chaque source de chaleur, le nombre des rayons transmis à travers une même lame diminue d'autant plus rapidement que l'épaisseur de cette lame est plus grande.

ÉPAISSEUR des LAMES.	TRANSMISSIONS DU VERRE SUR 100 RAYONS DE CHALEUR DE			
	LAMPE de LOCATELLI	PLATINE incandes-cent.	CUIVRE à 400°.	CUIVRE à 100°.
Verre blanc.				
$0^{mm},07$	77	57	34	12
$0^{mm},5$	54	37	12	1
1	46	31	9	0
2	41	25	7	0
4	37	20	5	0
6	35	18	4	0
8	33	17	3	0
Verre noir.				
1	26	25	12	0
2	16	15	8	0

En rapprochant ces résultats de celui de l'expérience de sir John Herschel, on voit qu'une lame de verre d'une épaisseur convenable est fort transparente pour les rayons de chaleur solaire, tandis qu'elle est opaque pour les rayons calorifiques émis par le cuivre noirci à 100°.

5° La chaleur qui vient de traverser une substance diathermane en traverse plus ou moins facilement d'autres.

Ainsi, les rayons qui sortent d'une lame de verre noir opaque sont presque tous transmis par les corps diathermanes incolores ; une seconde lame de verre noir en laisse passer plus de la moitié, et l'alun les intercepte tous.

Telles sont les expériences décisives qui permirent à Melloni d'affirmer non-seulement que la chaleur est formée comme la lumière de rayons d'espèces différentes; mais aussi que les corps diathermanes présentent tous à l'exception du sel gemme une sorte de teinte ou de coloration calorifique, en vertu de laquelle ils interceptent certains rayons et transmettent ceux qui correspondent à cette teinte. La propriété qu'il reconnut au sel gemme d'être parfaitement incolore pour toute espèce de rayons de chaleur lui permit d'ailleurs de répéter dans d'excellentes conditions l'expérience de W. Herschel, et de constater que le spectre calorifique s'étend au delà du rouge beaucoup plus loin que ne l'avait jugé l'observateur anglais, faute de s'être servi d'un prisme assez diathermane pour les rayons obscurs.

Ajoutons, en terminant ce court résumé, qu'un grand nombre de phénomènes chimiques, tels que ceux qui ont amené l'invention de la photographie sont dus à l'influence du soleil, et qu'ils ont révélé dans le spectre solaire l'existence d'une nouvelle espèce de rayons. Ce fut Scheele qui remarqua le premier, vers 1770, l'action de la lumière du soleil sur le chlorure d'argent et qui trouva que cette action réside principalement dans les rayons violets. Après lui, Seebeck, Ritter, Wollaston et Bœckman reconnurent que l'influence chimique du soleil augmente en allant du

rouge au violet, et qu'elle atteint son maximum au delà de cette dernière teinte, dans une région où la lumière et la chaleur cessent d'être appréciables à nos sens. Il en a fallu conclure par suite que certains rayons solaires ne sont ni lumineux ni calorifiques, ou du moins qu'ils n'affectent pas sensiblement nos organes sous ce double rapport, tandis qu'ils excellent à provoquer des actions moléculaires appartenant au domaine de la chimie : de là le nom de rayons chimiques qui leur a été donné. Bérard a d'ailleurs prouvé que ces nouvelles radiations se comportent comme le reste des rayons solaires dans les phénomènes de la réflexion, de la réfraction, etc. Enfin, Biot, puis MM. Malagutti et Becquerel ont étudié l'absorption des rayons chimiques par les lames transparentes. Le dernier de ces observateurs a trouvé, en particulier, que les lames de verre jaunes et rouges sont à peu près opaques pour ces sortes de rayons.

En résumé, le spectre solaire semble être formé de trois spectres distincts bien que superposés en partie. Mais les rayons calorifiques lumineux et chimiques sont-ils réellement de nature différente, ou chaque rayon solaire jouit-il à des degrés inégaux de la triple faculté d'échauffer, d'éclairer et de faire naître des actions chimiques? Telle est la question que se posent actuellement les physiciens. Il est probable que les progrès ultérieurs de la science viendront dissiper tous les doutes à cet égard. En attendant, la seconde hypothèse paraît devoir être préférée comme étant la plus simple.

CHAPITRE III

SOMMAIRE. — Intensité de la chaleur solaire à la surface du sol; résultat des observations de de Saussure, de Flaugergues, de sir John Herschel et de Pouillet. — Influence de la sécheresse, de l'humidité de l'air et des épaisseurs atmosphériques sur l'ardeur du soleil. — L'intensité de la radiation solaire à midi est la même en hiver qu'en été. — Elle est très-grande à la cime des montagnes, bien que l'air y reste frais; expériences de de Saussure à ce sujet. — Les régions équatoriales où l'ardeur du soleil est excessive sont celles où l'air est le plus sec. — Travail que peut produire la chaleur solaire reçue par une surface d'un mètre carré en une minute à la latitude de Paris.

Bouguer et de Mairan paraissent être les premiers qui se soient occupés d'évaluer l'intensité de la radiation solaire ; mais, les nombres auxquels ils sont parvenus sous ce rapport ne sont pas assez exacts pour qu'il y ait lieu de s'en occuper ici.

De Saussure jugeait, comme on l'a vu plus haut, son héliothermomètre propre à mesurer la vraie somme de chaleur que le soleil envoie à la terre. Cependant, si cet instrument peut servir à comparer entre elles les variations que subit la radiation solaire durant le jour ou dans le cours d'une année, il ne semble pas susceptible d'accuser avec toute la précision désirable la quantité de chaleur qui tombe par minute et par mètre carré sur un plan perpendiculaire à la direction des rayons du soleil.

On peut en dire autant de l'actinomètre de W. Herschel, instrument qui diffère peu de l'héliothermomètre, mais qui n'est pas d'une aussi facile construction.

H. Flaugergues (1755-1835), dans sa retraite de Viviers où il cultivait paisiblement les sciences, entreprit à partir de 1818 une longue série d'expériences en vue de mesurer

l'intensité de la radiation solaire; il se servit à cet effet de deux thermomètres identiques à boule noircie, dont l'un restait à l'ombre, tandis que l'autre était directement exposé au soleil avec toutes les précautions convenables. La comparaison de ces instruments lui permit de constater l'élévation de température produite par l'insolation directe dans celle des boules qui s'y trouvait soumise; mais il restait à calculer et la quantité de chaleur correspondante et la section de la boule recevant d'aplomb les rayons du soleil. Or, c'est là ce que Flaugergues ne paraît pas avoir tenté. Il reconnut toutefois que l'intensité calorifique de la radiation solaire est la même dans nos climats au solstice d'hiver qu'au solstice d'été et que les vents les plus forts n'ont pas d'influence sur elle.

Enfin, sir John Herschel, pendant son séjour à partir de 1834 au cap de Bonne-Espérance, put conclure d'expériences faites avec l'actinomètre inventé par son père que, dans ce pays, l'effet calorifique d'un soleil vertical au niveau de la mer suffirait à fondre une épaisseur de $0^m,1915$ de glace par minute. Vers la même époque, Pouillet en évaluant par une méthode rigoureuse l'intensité de la radiation solaire à Paris trouvait que le soleil par un beau jour pourrait y fondre en une minute une épaisseur de glace de $0^m,1786$. Ces deux nombres déterminés dans des circonstances si différentes présentent, comme on voit, un accord satisfaisant.

On trouvera le détail des expériences de Pouillet dans son excellent traité de physique, ou dans les comptes rendus de l'Académie des sciences pour 1838; nous ne ferons ici que rappeler les principaux résultats obtenus par cet habile observateur, résultats bien propres à montrer l'im-

portance d'une source calorifique à laquelle on n'a pas fait grande attention jusqu'ici.

Pouillet a inventé pour ce genre de recherches deux instruments qu'il appelle, l'un, pyrhéliomètre direct, l'autre, pyrhéliomètre à lentille. Le premier de ces instruments lui servait dans les temps calmes : il consistait en un vase d'argent très-mince, ayant la forme d'un tambour de $0^{m},1$ de diamètre, et de $0^{m},015$ de hauteur. Ce vase contenait environ 100 gr. d'eau. L'une de ses bases était noircie.

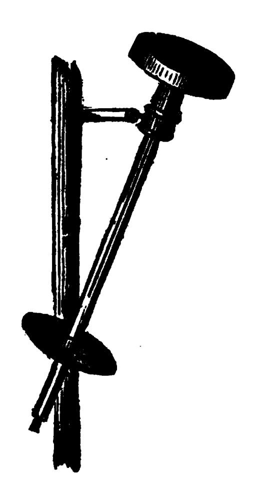


Fig. 3.

L'autre s'adaptait, vers son centre, à un tube renfermant un thermomètre dont la boule plongeait dans l'eau du vase et pouvait en faire connaître à chaque instant la température.

La base noircie du tambour étant exposée perpendiculairement à la direction des rayons solaires. Pouillet mesurait avec toute l'exactitude possible l'élévation de tempé-

rature T produite en cinq minutes dans l'appareil par l'insolation directe, et il lui suffisait de multiplier T par le nombre 0,4628 dépendant de la nature et des dimensions de l'instrument pour en conclure la quantité de chaleur versée par le soleil pendant le même temps sur la base du tambour.

Le pyrhéliomètre à lentille, un peu moins simple que celui dont nous venons de donner une idée, ne servait que dans le cas où l'agitation de l'air ne permettait pas l'usage de ce dernier.

Pouillet a commencé par mesurer l'intensité calorifique de la radiation solaire à différentes heures de la journée, et il s'est procuré de la sorte de nombreuses séries d'observations, telles que la suivante, où l'épaisseur d'air répondant à un trajet vertical est prise pour unité.

28 Juin 1867.

HEURE.	ÉPAISSEUR D'AIR.	VALEURS DE T.
7 h. 30	1,860	3° 8.
10 30	1,164	4
Midi	1,107	4, 7
1 h.	1,132	4, 65
2	1,216	4, 6
4	1,648	4
6	3,165	2, 4

Ces variations de température tiennent, comme on sait,

à ce que les rayons du soleil nous arrivent d'autant plus affaiblis qu'ils ont dû traverser une plus grande épaisseur d'air, ou que la direction de leur trajet dans l'atmosphère s'écarte davantage de la verticale. Aussi le soleil nous semble moins ardent à son lever ou près de son coucher qu'au milieu du jour. C'est d'ailleurs à la même cause qu'il faut attribuer les différences de température entre la zône torride et les autres zônes terrestres.

Pouillet a vu de plus que les résultats de ses mesures directes pouvaient se représenter par une formule très-simple, permettant de calculer, moyennant deux observations seulement : 1° la quantité de chaleur qui, en une minute, entre par chaque centimètre carré dans l'atmosphère; 2° la portion P de cette chaleur que l'air nous transmet et par suite l'absoption correspondante 1-P.

D'après cette formule, si l'atmosphère terrestre n'existait pas, il tomberait en une minute sur chaque centimètre carré du grand cercle qui sert de base à l'hémisphère éclairé par le soleil une quantité de chaleur exprimée par le nombre 1,7633, en prenant pour unité celle qui élève de zéro à 1° la température d'un gramme d'eau. Des valeurs correspondantes de T et de l'épaisseur d'air traversée, prises non pas seulement dans quelques séries, mais dans toutes, ont constamment fourni ce nombre à Pouillet pour la mesure de la radiation solaire, abstraction faite de l'atmosphère terrestre. Quant à l'absorption que subissent les rayons du soleil, même dans le trajet vertical à travers cette atmosphère, elle varie d'un jour à l'autre suivant l'état du ciel. Ainsi Pouillet a trouvé que, pour un lieu placé dans les mêmes conditions atmosphériques que Paris mais ayant le soleil à son zénith, on avait :

DATES.	P.	1-P.
28 Juin.	0,7244	0,2756
28 Juillet.	0,7285	0,2415
22 Septembre.	0,7780	0,2220
4 Mai.	0,7556	0,2444
11 Mai.	0,7888	0,2112
Soleil d'hiver.	0,7488	0,2512

« Il en résulte, dit Pouillet, que dans le trajet vertical, l'atmosphère absorbe au moins les 0,21 de la chaleur incidente, et au plus les 0,27, sans que le ciel cesse d'être serein. Je dois ajouter cependant que le 28 juin, auquel correspond l'absorption de 0,28, on distinguait un léger voile blanc sur la voûte du ciel. D'ailleurs, d'autres observations, pour lesquelles les séries n'ont pas pu être complètes ne m'ont accusé qu'une absorption de 0,18. Ainsi, l'on peut dire que l'absorption atmosphérique est comprise entre 18 et 24 ou 25 centièmes, sans qu'il soit possible de distinguer dans le ciel des vapeurs qui en troublent la transparence. »

La valeur moyenne de P trouvée par Pouillet, en supposant le soleil au zénith de Paris, est 0,759 ; c'est-à-dire que sur 1,000 rayons entrant verticalement dans l'atmosphère terrestre, il en arrive en moyenne 759 au sol de Paris.

Après Pouillet, M. le comte de Gasparin s'est proposé de déterminer au profit de l'agriculture, « non-seulement la quantité de chaleur solaire qui frappe les corps opaques,

mais encore celle qui peut s'accumuler dans ces corps : en un mot l'état variable de la température de ces corps exposés au soleil aux différents jours de l'année et aux différentes heures du jour » (Comptes rendus de l'Académie des sciences pour 1853). L'instrument dont le savant agronome s'est servi dans cette circonstance est d'une extrême simplicité. Il consiste en « une sphère de cuivre mince de 10 centimètres de diamètre, pesant au plus de 90 à 100 grammes, portant à son sommet une ouverture dans laquelle on engage un thermomètre dont la boule se soutient au centre à peu près de la sphère. L'ouverture est lutée ensuite par de la gomme laque ou de la cire. Cette sphère, portée sur un pied fortement fixé pour que le vent ne la renverse pas, placée à l'abri du rayonnement des corps environnants, et, autant que possible sur un poteau isolé, est peinte avec deux couches de noir de fumée appliquées au moyen d'une huile siccative. »

« Nous avons, dit M. de Gasparin, employé la boule à déterminer la chaleur qui vient du soleil dans un temps donné, et le résultat de douze expériences faites au mois de février 1853, au château de Pomerols, près de Tarascon-sur-Rhône, nous a donné une valeur moyenne de 0,680 pour 1° de chaleur solaire qui traversait l'atmosphère à cette époque.

« A Versailles, M. Haëghens, se servant du même moyen, trouvait le 1er mai, à 8 h. 50 m. du matin, 0,431 ; à 11 h. 50 m., 0,7276 ; enfin, à 6 heures du soir, 0,8346. La radiation avait augmenté pendant toute la journée.

« M. Pouillet avait obtenu à Paris une valeur moyenne de 0,759. En nous servant de son pyrhéliomètre, nous avons eu au mois de juillet et d'août 1842, à Orange,

une moyenne de 0,6759, un maximum de 0,8720 et un minimum de 0,4904. »

M. de Gasparin considère également, dans ces sortes d'expériences, ce qu'il appelle la faculté d'accumulation de la boule, faculté qui dépend de la diaphanéité de l'air, de sa température et de son état d'humidité. Il trouve, par exemple, que :

« A Versailles, pendant le mois d'août 1852, de 2 à 3 heures, la faculté d'accumulation a été exprimée par le chiffre 5,756 ;

« Dans le même mois, à Orange, par le chiffre 7,132 ;

« Enfin, au grand Saint-Bernard, par le chiffre 13,267 ;

« Cette grande quantité de chaleur du Saint-Bernard, ajoute-t-il, n'a rien qui doive étonner, si l'on pense que cette station est élevée de 2,491 mètres au-dessus de la mer ; que la moyenne de la pression barométrique y est de 563^{mm},77, et qu'ainsi l'épaisseur de l'atmosphère au zénith étant 1, le baromètre au niveau de la mer a 262^{mm},34 ; la couche d'air qui surmonte le point n'est que les 0,7395 de celle qui pèse sur la mer.

« Il est facile de concevoir aussi que les rayons solaires éprouvent bien moins d'obstacles dans un air moins dense, plus froid et par conséquent moins chargé de vapeurs aqueuses ; car la tension des vapeurs décroît plus rapidement que le poids de l'air ; ainsi à Marseille, pour 14°,1 de température moyenne, la tension de saturation est de 11^{m},99, et, au grand Saint-Bernard, pour une température moyenne de 2°,66, cette tension n'est plus que de 3^{m},75 ; c'est-à-dire que, pour une pression atmosphérique des trois quarts de celle de Marseille, la tension de la vapeur n'est plus que d'un tiers. »

C'est à de Saussure que l'on doit la première idée de comparer les intensités de la radiation solaire à deux hauteurs différentes. On avait remarqué de son temps qu'un verre ardent perd de sa force au sommet d'une montagne élevée, mais au liêu d'assigner à ce phénomène sa véritable cause, en observant que la combustion des corps est d'autant moins vive qu'ils brûlent dans un air plus rare, on s'était hâté d'en conclure que les rayons solaires ne sont pas chauds par eux-mêmes et qu'ils ont besoin pour engendrer la chaleur de se combiner à quelque principe subtil exhalé par la surface terrestre. Pour combattre cette manière de voir, de Saussure n'eut qu'à relever les indications de son héliothermomètre à deux stations dont la différence de niveau était de 1,514 mètres environ.

« Dans l'intention dit-il, de faire avec cette boîte deux expériences comparatives et bien parallèles entre elles, je la fis porter sur la cime du Cramont, le 16 juillet 1774 ; là je la réchauffai lentement au soleil, jusqu'à ce que le thermomètre, qui était au fond, eût atteint le 50[e] degré : dès lors je la tins exposée directement aux rayons du soleil pendant une heure précise, c'est-à-dire depuis 2 h. 12 m. jusqu'à 3 h. 12 m. ; et dans cette heure le thermomètre monta de 50° à 70°. Un thermomètre semblable, appliqué sur le liége noirci au dehors de la boîte, était monté à 21 degrés, et un troisième thermomètre, à boule nue, exposé en plein aux rayons du soleil, à 4 pieds au-dessus du garon, ne se soutenait qu'à 5°.

« Le lendemain, au retour de Courmayeur, où j'eus le bonheur d'avoir un temps clair, parfaitement semblable à celui de la veille, je choisis une prairie découverte dans laquelle j'établis mon appareil : je fis en sorte,

en le réchauffant lentement au soleil, qu'à 2 h. 12 m. précises le thermomètre au fond de la boîte se trouvât exactement à 50°, et dès lors je tins ma boîte constamment exposée au soleil pendant une heure précise, en la retournant aux mêmes périodes et le même nombre de fois que sur le Cramont. Cependant le thermomètre renfermé dans la boîte ne monta qu'à 60°, c'est-à-dire moins haut d'un degré que sur le Cramont, quoique celui qui était placé sur le liége en dehors de la boîte montât de 6° plus haut qu'au Cramont, savoir à 27°, et celui qui était en plein air, à 14° de plus que sur la montagne, savoir à 19°.

« Donc, dans les circonstances les plus semblables qu'il soit, à ce que je crois, possible de choisir, une différence de 777 toises, dont la cime du Cramont est plus élevée que Courmayeur, diminua de 14° la chaleur que les rayons du soleil étaient capables de donner à un corps entièrement exposé à l'action de l'air extérieur; de 6°, seulement, celle d'un corps qui était en partie à l'abri de cette action, et elle augmenta, au contraire, d'un degré, celle d'un troisième corps qui en était entièrement garanti. »

Les expériences de de Saussure ont été reprises dans notre siècle et poursuivies, de 1832 à 1842, par Forbes et Kaemtz. Ces deux observateurs, en opérant à Brientz et sur le Faulhorn, avec une différence de niveau de 2,119 mètres, ont trouvé que:

1° La radiation solaire est, comme l'avait constaté de Saussure, plus forte sur les montagnes que dans les plaines.

2° Tout faisceau de chaleur solaire est formé de deux sortes de rayons : les uns facilement absorbables par

l'atmosphère et formant à peu près les 0,8 du nombre total, les autres se refusant absolument à toute extinction.

3° Le nombre des rayons de premier ordre décroît en progression géométrique, et se réduit de 80 à 33 pour 100 dans le trajet vertical à travers l'atmosphère.

Forbes conclut de ces résultats remarquables que la portion de chaleur solaire qui, dans nos climats, arrive jusqu'à la surface du sol, n'est pas aussi grande que l'avait pensé Pouillet, et qu'au lieu de former les 0,75 du nombre des rayons extra-atmosphériques, elle n'en est que les 0,53.

Ajoutons enfin, pour achever de caractériser l'influence de l'atmosphère sur les radiations calorifiques du soleil, que, d'après Melloni et Volpicelli, un faisceau de chaleur solaire ne traverse pas une plaque diathermane avec une égale facilité aux différentes heures du jour, et que, par suite, la composition du faisceau varie avec l'épaisseur d'air qu'il a traversée.

Les mêmes circonstances qui favorisent l'intensité de la radiation solaire à la cime des montagnes élevées empêchent l'air de s'y échauffer : aussi, sans compter la fraîcheur des nuits, le moindre vent suffit-il pour y amener un abaissement notable de température. Il ne faut donc pas s'étonner que les explorateurs de ces hautes régions éprouvent ordinairement au soleil une chaleur accablante, tandis qu'il leur suffit de se mettre à l'ombre pour ressentir aussitôt le froid glacial de l'atmosphère. L'occasion s'offrit souvent à Bouguer d'étudier ce phénomène sur le plateau de Quito; mais il était réservé à de Saussure de l'observer dans des conditions encore plus

remarquables, puisque ce fut après une ascension périlleuse à travers les neiges que l'intrépide naturaliste, parvenu à la cime du Mont-Blanc, y trouva, malgré le froid de ces régions, l'ardeur des rayons du soleil insupportable quand ils frappaient directement les mains ou le visage. Un illustre physicien anglais, M. Tyndall, est venu confirmer, sur ce point, le témoignage de de Saussure.

« L'air, sur les hautes montagnes, dit-il dans son *Traité de la chaleur,* peut être excessivement froid, quoique le soleil darde ses rayons brûlants. Les rayons solaires, qui, dans leur contact avec la peau humaine, sont presque douloureux, restent impuissants à échauffer l'air d'une manière sensible ; il suffit de se mettre parfaitement à l'ombre pour sentir le froid de l'atmosphère. Jamais, dans aucune circonstance, je n'ai tant souffert de la chaleur solaire qu'en descendant du corridor, au grand plateau du Mont-Blanc, le 13 août 1857 ; pendant que je m'enfonçais dans la neige jusqu'aux reins, le soleil dardait ses rayons sur moi avec une force intolérable. Mon immersion dans l'ombre du dôme du Gouté changea à l'instant même mes impressions ; car là l'air était à la température de la glace. Il n'était pourtant pas sensiblement plus froid que l'air traversé par les rayons du soleil ; et je souffrais, non pas du contact de l'air chaud, mais du choc des rayons calorifiques lancés contre moi à travers un milieu froid comme la glace. » (Traduction de M. l'abbé Moigno.)

Plus on s'élève, d'ailleurs, dans l'atmosphère, plus le contraste entre l'ardeur du soleil et la température de l'air est frappant ; nous en trouvons diverses preuves

dans les récits des aéronautes, mais la suivante suffira : elle est extraite des rapports de M. Camille Flammarion sur son ascension du 15 avril 1868 :

« Quoique le soleil soit ardent sur notre visage, dit l'infatigable observateur, la température décroît constamment. A 3,000 mètres, nous avons déjà 7 degrés au-dessous de zéro. A 4,150 mètres, point de notre plus grande élévation, nous avons eu 12 degrés de froid, tandis que le soleil était d'une chaleur intolérable pour nos têtes. »

La série d'ascensions périodiques que vient d'inaugurer M. Flammarion promet, comme on voit, à la météorologie tout entière une riche moisson de faits intéressants.

Si la sécheresse est, en quelque sorte, permanente dans les hautes régions de l'atmosphère, l'air des plaines ou des montagnes peu élevées est généralement humide, ce qui en diminue plus ou moins la transmission calorifique. Ce fut P. Prévost qui, dans son *Traité du calorique rayonnant*, publié en 1809, avança le premier que l'air humide perd de sa transparence par la chaleur; cette manière de voir fut confirmée depuis par les expériences de M. Tyndall, qui regarde la chaleur absorbée par la vapeur d'eau répandue dans l'air comme étant égale à 72 fois environ celle qu'absorberait cet air s'il était sec. D'après ce même physicien, l'atmosphère peut être saturée de vapeur d'eau sans que l'azur du ciel en soit altéré; de sorte qu'une grande transparence pour la lumière serait compatible avec une grande opacité pour la chaleur. Mais un autre observateur, qui s'est beaucoup occupé de cette question, M. Poey, trouve, au contraire, que plus l'air est sec, plus on est frappé de la pureté du

ciel, et que la première annonce d'un changement de temps est l'apparition d'un voile de vapeur qui vient en ternir l'azur. On peut, d'ailleurs, à l'appui de cette dernière opinion, citer une remarque déjà ancienne, puisqu'elle remonte à l'année 1774 : elle est due à Macquer (1718-1784), célèbre chimiste français, qui, dans le compte rendu de ses essais au moyen de verres ardents, s'exprime ainsi :

« Une circonstance dont il est très-essentiel d'être prévenu, et que tous ceux qui se sont servis avant nous de ces instruments ont éprouvée, ainsi que nous, avec beaucoup de désagrément, c'est que, dans un climat tel que celui-ci, et peut-être même dans tous les climats, à peine, pendant le cours de toute l'année, se trouve-t-il sept ou huit jours entièrement favorables aux expériences. Il ne suffit pas pour cela qu'il fasse du soleil, et ce que tout le monde appelle un beau temps; il faut encore que l'air soit très-pur et entièrement exempt de poussière et de vapeurs de quelque genre que ce soit. L'expérience ne nous a démontré que trop souvent que cette circonstance influe plus qu'on ne pourrait l'imaginer sur la force et les effets du foyer. Le moyen qui m'a paru le plus sûr pour reconnaître les temps les plus favorables au travail, ça été de considérer, soit à la vue simple, soit encore mieux avec une lunette, l'objet le plus éloigné qu'on peut apercevoir : plus on voit cet objet bien nettement et bien distinctement, plus il est certain que l'air est bien disposé pour les expériences ; mais ce qu'il y a de bien fâcheux, à cause de l'incertitude que cela jette sur les résultats des expériences, c'est que l'air est sujet, à cet égard, à des vicissitudes fréquentes et souvent très-promptes. Il m'est arrivé

nombre de fois de voir, dans le cours d'une expérience qui ne durait que quelques minutes, des matières qui, par leur fonte parfaite et tous les autres phénomènes de la plus violente chaleur, éprouvaient la plus forte action du foyer se refroidir presque instantanément jusqu'à se figer, sans qu'il parût dans l'air aucun changement sensible ; et, dans ce cas, lorsque j'avais eu la précaution de m'assurer de l'état de l'air par l'épreuve de la lumière en commençant l'expérience, si je réitérais la même épreuve lorsque le foyer me paraissait moins actif, je ne manquais guère d'observer que l'objet éloigné me paraissait sensiblement moins net. »

Il est juste de reconnaître d'ailleurs que, dès l'année 1702, Homberg (1652-1715), médecin du duc d'Orléans, avait fait la plupart des remarques précédentes en se servant du verre ardent du Palais-Royal. Il avait même observé que les rayons solaires n'ont jamais plus de force qu'après une pluie abondante, quand le soleil apparaît entre deux nuages ; et la raison en est sans doute que l'air se trouve alors momentanément débarrassé des poussières qu'il tient en suspension et d'une partie de sa vapeur d'eau. Homberg reconnut enfin que le foyer de son verre ardent n'avait qu'une faible énergie pendant les chaleurs extraordinaires de l'été de 1705, tandis qu'il produisait durant les froids les plus vigoureux des effets calorifiques remarquables ; mais l'influence de la densité de l'air sur la combustion jouait probablement le principal rôle dans cette circonstance. Au reste, on a déjà vu que Flaugergues avait été conduit par des observations précises à reconnaître que l'intensité de la chaleur solaire est la même en hiver qu'en été ; et tel est aussi le résultat des

expériences que vient de publier le P. Secchi, directeur de l'observatoire romain. Cet astronome ayant en effet essayé de mesurer avec un appareil de son invention l'intensité calorifique de la radiation solaire, a trouvé non-seulement qu'elle n'est pas moindre au solstice d'hiver qu'au solstice d'été, mais encore que pour une même hauteur du soleil au dessus de l'horizon elle est deux fois plus grande à la première époque qu'à la seconde. De tous ces faits on est donc forcé à conclure que l'air humide est beaucoup moins perméable que l'air sec aux rayons du soleil, et que le froid en ménageant à ces rayons un passage plus facile dans l'atmosphère leur conserve une partie de leur ardeur.

Cette dernière influence n'est sans doute pas à négliger dans les zones glaciales ; mais, ce qui contribue surtout à rendre excessive la chaleur des étés de ces régions, c'est que la durée du jour peut y varier de vingt-quatre heures à six mois. Aussi, entre 70 et 80 degrés de latitude nord, le soleil est-il parfois assez ardent pour fondre comme à l'équateur le goudron des vaisseaux. Le voyageur Acerbi dit avoir souvent relevé en Laponie des températures de 40 à 45 degrés au soleil ; il se plaint à diverses reprises de la chaleur accablante dont il avait à souffrir durant ses excursions à travers ce pays. Voici d'ailleurs une des plus curieuses observations qu'il fit à ce sujet :

« Cherchant, dit-il, à établir quelle pouvait être la chaleur du soleil à minuit, temps où le soleil est élevé à l'horizon d'environ deux ou trois de ses diamètres, nous voulûmes tenter si nous pourrions allumer nos pipes au foyer d'un verre convexe. A peine avions-nous commencé l'expérience, que la fumée en indiqua le succès. »

Cependant il peut se faire que le vent, la sécheresse de

l'air et la réverbération produite par les neiges des rayons solaires vers l'espace amènent dans les régions boréales de grands abaissements de température. C'est ainsi que le comte Henry Russell, voyageant en Sibérie, a vu par un soleil radieux, l'eau-de-vie geler sous le foin, et le thermomètre descendre à plus de 35 degrés au-dessous de zéro. Disons cependant que dans cette circonstance, l'exposition d'un thermomètre ordinaire à l'air libre ne pouvait fournir que des indications erronées relativement à l'intensité de la radiation solaire, et qu'il eût été préférable, ou de mettre l'instrument à l'abri du vent comme le recommande Flaugergues, ou de se servir d'appareils plus exacts, tels que ceux de de Saussure ou de Pouillet.

L'air étant également très-sec dans les lieux éloignés des mers et privés d'eau, l'ardeur du soleil y devient le plus souvent insupportable pendant presque toute la durée du jour, tandis que le froid des nuits y est toujours très-vif. C'est ce qu'on remarque, en particulier sur les plateaux de l'Asie centrale, et surtout dans certaines parties de la zone torride, telles que le Sahara, l'intérieur de l'Australie, etc. Afin de donner une idée des écarts de température observés dans ces dernières régions, disons qu'en Australie, par exemple, le thermomètre varie parfois de 50 degrés en un jour et que deux voyageurs dignes de foi, le comte Henry Russell et le capitaine Sturt, disent y avoir constaté l'un 64 et l'autre 71 degrés au soleil.

Nous devons faire observer encore que dans les contrées sèches l'air n'est pas toujours d'une grande pureté, et qu'au Sahara, par exemple, il est mélangé de poussières très-fines dont les pluies ne viennent jamais le débarrasser. Jusqu'à quel point la radiation solaire en est-elle

affaiblie? Quelle est l'intensité de cette même radiation dans les autres parties de la zone torride, où le ciel plus riche en vapeur d'eau que dans les zones tempérées se montre si transparent pour la lumière? Dans quelle proportion s'éteignent enfin les rayons calorifiques qui traversent obliquement l'atmosphère pour aller réchauffer les zones glaciales? Telles sont les principales questions qu'il importerait encore de résoudre; malheureusement on est forcé de s'en tenir à cet égard à de simples conjectures, faute de données précises. Il serait cependant d'autant plus nécessaire de mesurer directement l'intensité de la radiation solaire à diverses latitudes que les variations hygrométriques à la surface du globe sont peut-être fort différentes de celles qu'on observe en France dans le cours d'une année, et que par suite les calculs de Pouillet, uniquement fondés sur ses expériences de Paris peuvent ne pas donner la vraie somme de chaleur que le soleil envoie annuellement à la terre.

Quoi qu'il en soit de la solution de ces questions importantes, et quand même l'intensité de la radiation solaire dans les régions intertropicales ne serait guère plus grande qu'à Paris, nous allons essayer de montrer que la plupart des contrées où le ciel reste longtemps pur offrent de sérieux avantages au point de vue des applications mécaniques de la chaleur solaire.

A ne considérer que les expériences de Pouillet, chaque centimètre carré normalement exposé aux rayons du soleil reçoit à Paris environ une unité de chaleur par minute, de 8 heures du matin à 5 ou 6 heures du soir pendant tout le cours de l'année. D'où il suit qu'il tombe, dans les mêmes conditions, sur un mètre carré 10 calories par minute,

c'est-à-dire une quantité de chaleur suffisante pour faire bouillir en moins de dix minutes un litre d'eau à la température ordinaire. Afin d'évaluer d'une manière approximative le travail que peut ainsi recueillir une surface d'un mètre carré, observons qu'une calorie équivaut au minimum à un travail de 425 kgm.; en sorte que la surface en question reçoit 4,250 kgm. par minute, ce qui fait 70 kgm.,8 par seconde. Divisant ce dernier nombre par 75, valeur en kilogrammètres du cheval-vapeur, on trouve 0,94. Ainsi, le soleil par un beau jour lance pendant 8 ou 9 heures à Paris un travail de près d'un cheval-vapeur par mètre carré ! A la vérité, ce travail est purement théorique, et ce serait commettre une grave erreur que de le croire suffisant pour alimenter une machine à vapeur ou même à air chaud de la force d'un cheval. En outre, on ne saurait emmagasiner les rayons du soleil sans recourir à l'emploi de châssis vitrés qui en absorbent les 2 ou 3 dixièmes. Mais, il faudrait s'exagérer singulièrement l'importance de ces restrictions pour méconnaître celle de la source calorifique elle-même, surtout si l'on observe qu'on peut toujours se procurer un surcroît de chaleur incidente au moyen de réflecteurs de formes et de dimensions convenables. Au reste, on verra plus loin par des expériences variées beaucoup mieux que par un calcul approximatif que la chaleur du soleil serait loin d'être à dédaigner comme force motrice, même dans nos climats, si l'état du ciel permettait de la recueillir avec autant de régularité que sur d'autres points du globe.



CHAPITRE IV

SOMMAIRE. — Réflexion de la lumière et de la chaleur. — Propriétés des miroirs sphériques, cylindriques ou coniques. — Les glaces étamées ne réfléchissent pas aussi bien la chaleur que la lumière. — Les miroirs métalliques sont très-propres à réfléchir la chaleur. — Le pouvoir réflecteur d'une surface métallique polie dépend de la nature des rayons calorifiques. — Expériences de MM. Laprovostaye et Desains. — Le plaqué d'argent réfléchit très-bien la chaleur solaire. — Métaux qu'on peut encore employer pour cet usage. — Avantages et inconvénients des lentilles de verre. — Les réflecteurs métalliques sont de beaucoup préférables aux lentilles pour les applications usuelles.

La lumière et la chaleur sont, comme on sait, des fluides élastiques, c'est-à-dire que toutes les fois qu'un rayon lumineux ou calorifique BA vient frapper une surface brillante EZ en un point A, il s'y brise aussitôt en suivant à partir de ce point une nouvelle direction AC parfaitement déterminée et qu'on nomme le rayon réfléchi. Les lois qui président à ce phénomène sont les suivantes :

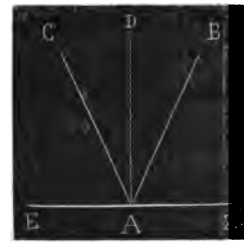


Fig. 4.

1° Le rayon incident BA, le rayon réfléchi AC et la normale AD à la surface brillante, sont dans un même plan.
2° L'angle de réflexion DAC est égal à l'angle d'incidence BAD.

La connaissance de ces lois permet de donner à la surface brillante une forme telle que les rayons réfléchis aillent tous passer par un même point appelé foyer, ou par une même ligne appelée ligne focale ; et l'on obtient de la

sorte des portions réfléchissantes de sphère, de cylindre, de cône, que l'on désigne sous le nom collectif de miroirs ardents.

Nous allons rappeler brièvement les propriétés de quelques uns de ces miroirs ou plutôt des lignes qui servent à les engendrer, en nous bornent d'ailleurs à considérer des faisceaux de rayons incidents parallèles, puisque tel est le cas des rayons solaires.

Soit, en premier lieu, AB un arc de cercle ayant pour milieu le point C et pour centre le point O. Si l'on regarde cet arc comme une ligne réfléchissante, on démontre sans peine que tout rayon incident MN, parallèle à la droite OC, se réfléchit sensiblement au milieu F de cette droite, pourvu toutefois que l'arc AB soit une assez petite fraction de la circonférence.

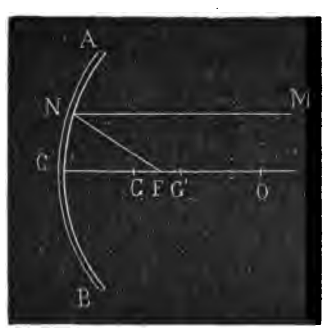


Fig. 5.

Dans le cas contraire les rayons incidents qui aboutissent aux extrémités A et B de l'arc se réfléchissent en un point G, plus voisin de C que le point F. Le calcul montre de plus que l'intervalle FG est environ $\frac{1}{1450}$, $\frac{1}{360}$, $\frac{1}{160}$, $\frac{1}{89}$, $\frac{1}{56}$, $\frac{1}{36}$, de la distance OC selon que l'arc AB est de 6, 12, 18, 24, 30, 36 degrés.

A la rigueur, les rayons solaires, n'étant pas exactement parallèles entre eux, viennent se réfléchir en un point G' situé entre F et O ; mais la distance FG' est inappréciable.

Veut-on maintenant connaître les propriétés des miroirs concaves formés d'une calotte sphérique ou d'une portion de cylindre à base circulaire, rien n'est plus facile grâce à la figure précédente.

En premier lieu, si l'arc AC tourne autour de la droite OC supposée fixe, il engendre une calotte sphérique dont les points O et C sont respectivement le centre et le pôle, et l'on voit de suite qu'un miroir concave de cette forme réfléchira vers le point F tous les rayons incidents parallèles à son axe OC.

En second lieu, si l'on conçoit qu'une droite de longueur donnée perpendiculaire en A au plan ACB, se déplace parallèlement à elle-même de telle sorte que son pied glisse le long de l'arc AB, comme tous les points de la droite décrivent des arcs égaux à ce dernier, et qu'elle engendre ainsi une surface cylindrique à base circulaire, on en conclut immédiatement qu'un miroir concave de cette forme concentre tous les rayons incidents parallèles à OC en une droite perpendiculaire en F au plan de l'arc AB et qui a même longueur que la génératrice de la surface cylindrique.

Si le point C n'était pas le milieu de l'arc AB, les rayons parallèles à la droite OC n'en viendraient pas moins concourir après leur réflexion vers le milieu F de cette droite : il en résulte que, dans le cas d'un miroir sphérique, les rayons réfléchis formeraient un cône oblique ayant pour sommet le point F et pour base le miroir lui-même ; tandis que pour un miroir cylindrique la ligne focale, sans cesser d'être perpendiculaire en F au plan de l'arc AB, se rapprocherait de l'un des deux bords du miroir auxquels elle serait parallèle.

D'après ce qu'on a dit plus haut, pour que les rayons parallèles à OC se réfléchissent en un même point F, il faut que l'arc AB ne contienne qu'un petit nombre de degrés. Or, comme la longueur d'un arc dont la valeur en degrés reste constante, est proportionnelle à son rayon, tant que le rayon OC sera très-petit, il en sera de même de l'arc AB, et les miroirs auxquels cet arc donnera naissance n'offriront pas une grande étendue. D'un autre côté, dans l'hypothèse d'un rayon et par conséquent d'un arc très-grand, la distance FC croîtra dans le même rapport que OC, et de là résulteront deux inconvénients assez graves : car, d'une part, si l'on suppose le plan de l'arc AB perpendiculaire à l'axe du monde et la droite CO dirigée vers le soleil, le déplacement du point F occasionné par le mouvement diurne de l'astre sera d'autant plus considérable dans un même temps que la distance FC sera plus grande ; et, d'autre part, l'intensité du foyer sera d'autant moindre que les rayons réfléchis auront dû pour s'y réunir traverser une plus grande épaisseur d'air. La conclusion qui découle naturellement de ces remarques, c'est que la circonférence ne peut guère servir à la construction des miroirs ardents de grande étendue. Mais il est facile, comme on va le voir, de trouver une courbe qui permette d'atteindre ce but avec toute la précision désirable.



Fig. 6.

Soient O F la direction des rayons incidents parallèles et F le point où l'on veut qu'ils viennent tous se réfléchir. Menons par le point quelconque D de O E une perpendiculaire à cette droite, et supposons qu'un rayon incident M N coupe cette per-

pendiculaire en N. Il s'agit de trouver la nature de la courbe que doit rencontrer M N pour aller se réfléchir en F et le point d'intersection des deux lignes.

Pour cela tirons la droite F N, et par son milieu I, menons-lui la perpendiculaire I T qui coupe M N en A : nous allons prouver que A est un point de la courbe cherchée et que M A se réfléchit suivant A F. En effet, il résulte de cette construction que les triangles N A I et F A I sont égaux entre eux, comme on peut le reconnaître d'ailleurs en repliant la figure autour de I T de façon que l'un de ces triangles s'applique sur l'autre : on en conclut l'égalité des angles I A N et F A I. Mais, l'angle I A N est aussi égal à l'angle T A M qui lui est opposé par le sommet : donc, les angles F A I et T A M sont égaux entre eux.

Cela posé, regardons la droite I T comme une ligne réfléchissante, et menons-lui la perpendiculaire ou normale A P. Il est clair que si des angles droits P A I, P A T, on retranche les angles égaux F A I, M A T, les restes F A P et P A M seront encore égaux. Donc le rayon MA, qui fait avec A P l'angle d'incidence M A P, se réfléchit suivant A F, et le point A appartient à la courbe cherchée.

Pour trouver la nature de cette courbe, observons que les droites A F et A N étant d'après la construction précédente égales entre elles, le point A est également éloigné du point F et de la droite D N. Or, cette propriété commune à tous les points de la courbe cherchée suffit pour la caractériser. On donne à une pareille courbe le nom de parabole; le point F en est le foyer, et la droite D N en est la directrice.

La construction qui a fourni le point A pourrait servir à déterminer d'autres points de la parabole; mais, il est plus

5

simple de procéder à cet égard de la manière suivante :

Soient F le foyer et D N la directrice de la parabole qu'il s'agit de construire. On mène d'abord par le point F

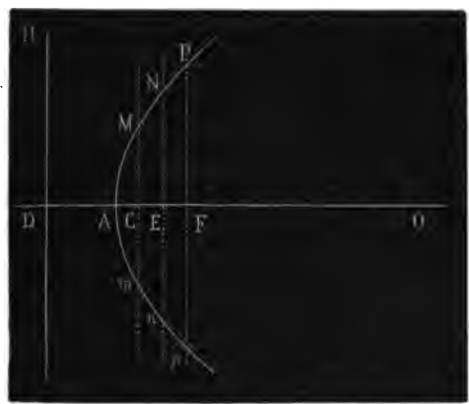


Fig. 7.

la perpendiculaire O D à la directrice, et l'on prend le milieu A de F D : ce point fait évidemment partie de la courbe ; c'est le sommet de la parabole et la droite O D en est l'axe.

Pour obtenir d'autres points de la courbe, on prend sur l'axe les points C, E, F,... etc., suffisamment rapprochés les uns des autres : par ces points on mène des perpendiculaires indéfinies à l'axe ; puis, du point F comme centre, avec les rayons D C, D E, D F,... on décrit des arcs de cercle qui coupent les perpendiculaires correspondantes aux points M, *m*, N, *n*, P, *p*,... et il ne reste plus qu'à joindre par un trait continu les points P, N, M, A, *m*, *n*, *p*,... pour obtenir avec une approximation convenable un arc de parabole. On voit, au reste, par cette construction, que la courbe a deux branches infinies parfaitement symétriques par rapport à O D.

Il suffit actuellement de concevoir que l'arc PA tourne autour de l'axe OD, supposé fixe, pour en conclure qu'il engendre un miroir concave propre à réfléchir en F tous les rayons parallèles à OD : ce miroir formé d'une portion de paraboloïde de révolution a reçu le nom de miroir parabolique.

Enfin, si l'on imagine qu'une droite perpendiculaire en P au plan de l'arc P A *p* se déplace parallèlement à elle-même de manière à ce que son pied glisse le long de cet arc, on voit qu'elle engendrera de la sorte une surface cylindrique dont la partie concave réfléchira les rayons incidents parallèles à O D suivant une droite perpendiculaire en F au plan de l'arc P A *p*, et d'ailleurs égale à la génératrice de la surface cylindrique.

De ces deux miroirs paraboliques le premier présente de très-grandes difficultés d'exécution, tandis que le second peut facilement se construire, même avec des dimensions considérables, au moyen d'un simple châssis de bois sur lequel on applique des feuilles métalliques brillantes. C'est dire assez que si l'un de ces appareils n'est pas pratique, l'autre est susceptible de rendre de grands services à bon marché.

Les miroirs ardents peuvent encore affecter la forme conique. En effet, soit A B C un cône droit à base circulaire, engendré par la révolution du triangle rectangle A B D autour du côté fixe B D : si l'on suppose que la surface intérieure de ce cône soit brillante, on voit sans peine que les rayons incidents parallèles à l'axe BD viendront après leur rencontre avec

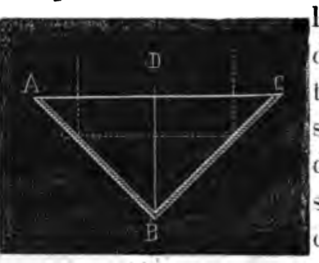


Fig. 8.

le miroir se réfléchir en différents points de cet axe ou de son prolongement, et que, par suite, ils auront pour ligne focale une portion de droite dirigée suivant B D. Dupuy, qui s'est occupé de cette question dans une note relative à un passage de Plutarque, montre de plus que, si le triangle rectangle générateur A B D est isocèle, la ligne focale est l'axe B D lui-même, et que cette ligne est alors plus courte, et par conséquent plus comburante, que si, l'ouverture A C du miroir restant la même, l'angle A B C au lieu d'être droit comme dans cette circonstance était obtus ou aigu. On verra plus loin que cette propriété n'avait point échappé aux anciens.

Comme il n'est pas nécessaire qu'un miroir ardent ait rigoureusement pour foyer soit un point, soit une ligne, on peut encore concentrer assez bien les rayons du soleil au moyen de certaines combinaisons de miroirs plans. Si nous ne donnons pas ici la théorie de cette espèce de réflecteurs, c'est qu'ils offrent peu d'intérêt au point de vue des applications, et que, d'ailleurs, nous aurons bientôt l'occasion d'y revenir en parlant des découvertes des anciens à ce sujet.

Quelle est maintenant la substance la plus propre à former de bons réflecteurs? Au premier abord, on serait tenté de donner la préférence aux glaces étamées, parce qu'elles réfléchissent mieux la lumière que tout autre miroir, et que, de plus, elles sont inaltérables à l'air. Mais, d'après ce qu'on sait des propriétés de la chaleur, il peut se faire que bon nombre de rayons solaires, après avoir traversé sans difficulté la glace, soient transformés en rayons obscurs par l'amalgame d'étain, et perdent ainsi la faculté de repasser à travers le verre. Or c'est là

ce qu'est venue confirmer l'expérience : en outre elle a montré que, jusqu'à présent, le mieux est de s'en tenir aux réflecteurs métalliques.

Mais les métaux polis ne jouissent pas tous au même degré de la faculté de réfléchir la chaleur; ils ne sont pas non plus également inaltérables à l'air; enfin ils sont d'un prix plus ou moins élevé; il convient, par conséquent, d'examiner quel est celui d'entre eux dont l'emploi, comme réflecteur, présente les meilleures garanties de succès.

On a cru longtemps que la réflexion s'effectuait à la surface d'un miroir avec la même intensité pour toute espèce de chaleur; mais les belles recherches entreprises à ce sujet par MM. Desains et Laprovostaye les ont conduits à cette conclusion.

NATURE des MIROIRS.	POUVOIR RÉFLECTEUR pour la CHALEUR SOLAIRE.
Argent	0,92
Or.	0,87
Métal des miroirs	0,64
Acier	0,60
Platine	0,60

Il en résulte donc que le pouvoir réflecteur des métaux polis, c'est-à-dire le rapport de la chaleur réflé-

chie à la chaleur totale reçue par ces métaux, dépend de l'espèce de rayons calorifiques que l'on considère. Comme nous n'avons à tenir compte ici que de la chaleur solaire, nous n'emprunterions au savant *Traité de physique* de M. Desains que le tableau précédent, s'il s'étendait à un plus grand nombre de métaux.

Mais, peut-être, n'est-il pas inutile d'y joindre cet autre tableau où les pouvoirs réflecteurs se rapportent à la lampe de Locatelli :

MÉTAUX.	POUVOIR RÉFLECTEUR.
Argent.	0,97
Or	0,96
Cuivre	0,93
Laiton	0,93
Métal des miroirs	0,86
Étain.	0,85
Acier.	0,83
Zinc	0,81
Platine poli.	0,80
Fer.	0,77

On voit par là que les miroirs d'argent sont les plus propres à réfléchir la chaleur. Ils sont, en outre, suffisamment inaltérables à l'air, comme nous avons pu nous en convaincre par une longue pratique. Enfin il suffit de les construire en plaqué d'argent pour que le prix en soit très-modéré.

L'alliage de cuivre et d'étain qui porte le nom de métal des miroirs réfléchit déjà beaucoup moins bien la chaleur que le plaqué d'argent. De plus, il s'altère très-vite à l'air. On doit en dire autant de l'acier, du laiton et du ferblanc. Cependant il paraît qu'en exposant les plaques de cuivre à la vapeur de sulfhydrate d'ammoniaque, dès qu'elles viennent d'être polies, on peut leur conserver pendant longtemps leur éclat.

Suivant M. Landrin, on fait encore d'excellents miroirs avec parties égales de platine et d'acier : ils reçoivent un beau poli et ne se ternissent pas. Avec 10 pour 100 de platine, l'alliage ne se ternit pas davantage, et prend également un assez beau poli.

Mais nous croyons inutile de nous étendre davantage sur ce sujet, persuadés qu'aussitôt que le besoin s'en fera sentir, l'industrie se mettra vite en mesure de livrer, à bon marché, d'excellents réflecteurs.

Une particularité qu'il importe encore de signaler, c'est que, d'après Melloni, le pouvoir réflecteur d'un métal varie avec l'état de dureté de sa surface : en sorte que de deux miroirs de laiton, par exemple, dont l'un est travaillé au tour, et l'autre au marteau, le second doit réfléchir le mieux la chaleur, comme étant le plus dur. Les miroirs fondus ou tournés ne seraient donc pas aussi efficaces, sous ce rapport, que les miroirs cylindriques, à la confection desquels on n'emploie que des plaques laminées. Disons, cependant, que des recherches plus récentes de MM. Laprovostaye et P. Desains ont permis de révoquer en doute l'assertion de Melloni, et que, d'après ces habiles observateurs, l'argent fondu, martelé, ou déposé chimiquement sur le cuivre, présente, à très-peu près, le

même pouvoir réflecteur, pourvu qu'il ait, dans tous les cas, le même degré de poli.

Si nous n'avons pas épargné les détails à propos des réflecteurs, c'est que nul autre genre d'appareils ne nous paraît offrir autant de garanties de succès pour les applications usuelles de la chaleur solaire. Certaines lentilles de verre, il est vrai, jouissent aussi de la propriété de concentrer les rayons du soleil, et l'on a même dû les préférer aux miroirs dans quelques opérations de chimie où la radiation solaire était employée à produire de hautes températures. Mais le motif de cette préférence n'existe plus, comme on va le voir, dans la question qui nous occupe : en sorte qu'il suffira de constater, au point de vue pratique, la supériorité, sous presque tous les rapports, des miroirs sur les lentilles, pour être en droit de conclure au rejet de celles-ci.

On sait qu'une lentille biconvexe, telle que ABCD, terminée par deux calottes sphériques ayant pour centres respectifs O et O', concentre, par réfraction, les rayons EB, HD,... parallèles à son axe OO', en un point F situé sur cet axe, non pas du même côté que les rayons incidents, mais du côté opposé. Il en résulte que l'axe OO' étant dirigé vers le soleil, le foyer F des rayons réfractés se forme au-dessous de la lentille, et peut agir directement sur des parcelles d'un corps fusible placées dans un creuset. A la rigueur, on obtiendrait un effet du même genre avec une zone métallique détachée d'un paraboloïde de révolution par deux plans menés per-

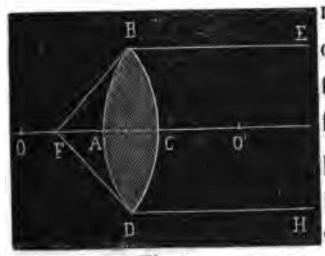


Fig. 9.

pendiculairement à l'axe au delà du foyer; mais on a déjà vu qu'un pareil miroir serait difficile à construire : et, comme les réflecteurs sphériques tournés vers le soleil ont leur foyer en l'air, dans la direction de cet astre, et qu'ils ne sauraient, en conséquence, échauffer intérieurement un creuset installé à ce foyer, on conçoit que les lentilles aient obtenu la préférence sur les miroirs pour les essais de cette nature. Mais on voit en même temps que, malgré tout l'intérêt qu'ils peuvent offrir au point de vue de la science, ces essais ne sont pas du domaine de l'industrie : quant aux applications qui font l'objet de cet ouvrage, elles ne présenteront jamais de semblables difficultés à vaincre. Si l'on ajoute à ce qui précède que les lentilles ne s'altèrent pas sensiblement à l'air, on aura fait connaître les deux seuls points où elles l'emportent sur les réflecteurs métalliques. Nous allons examiner maintenant en quoi elles leur sont inférieures.

Lorsqu'une lentille biconvexe reçoit sur une de ses faces un faisceau de rayons parallèles à son axe, elle réfléchit, d'abord, une partie de ces rayons, et le reste la traverse pour aller se concentrer au foyer. Mais, dans leur trajet à travers le verre, les rayons réfractés ne laissent pas que d'éprouver encore une absorption d'autant plus considérable que la lentille est plus épaisse. C'est là une conséquence immédiate des lois de la transmission calorifique. Au reste, on avait, bien avant les expériences de Melloni, des preuves directes du fait. Déjà, en 1774, Brisson et Cadet avaient reconnu que de tous les rayons solaires émergeant d'une grande lentille, ceux qui l'avaient traversée près de ses bords étaient les plus comburants. Mais ce n'est qu'au commencement de ce siècle

que le comte de Rumford démontra, d'une façon péremptoire, l'absorption de la chaleur solaire par les lentilles. A cet effet, il remplit d'eau deux vases métalliques exactement semblables, dont la surface extérieure était noircie; puis il plaça l'un de ces vases derrière une lentille exposée au soleil, tandis qu'il faisait arriver sur l'autre un faisceau de rayons solaires par une ouverture libre de même diamètre que la lentille, et il put constater, de la sorte, que le vase soumis à l'insolation directe s'échauffait plus rapidement que l'autre. Ajoutons qu'il varia cette expérience en plaçant à l'ouverture libre une lentille identique à la première, et qu'il reconnut ainsi : 1° que les deux vases s'échauffaient de la même façon quand les cônes de rayons réfractés rencontraient indifféremment leur surface noircie en deçà ou au delà des foyers; 2° que l'échauffement se ralentissait un peu pour le vase à la surface duquel se trouvait l'un de ces foyers.

Puisque l'épaisseur des lentilles nuit à leur transmission calorifique, on ne saurait, même en laissant de côté la question de la dépense, donner à ces instruments de grandes dimensions à moins d'affaiblir leur courbure et d'éloigner par conséquent leur foyer, ce qui en diminuerait la puissance. Les lentilles dites à échelons n'offriraient pas, il est vrai, le même désavantage puisqu'elles ont une grande surface sous une épaisseur relativement assez faible; mais elles sont d'une construction difficile et coûtent encore plus cher que les autres. Il ne faut pas non plus songer à l'emploi d'un châssis formé d'un grand nombre de petites lentilles parce que cet appareil intercepterait en pure perte une grande partie de la chaleur incidente. Enfin, toute lentille bi-convexe, par cela seul qu'on

l'interpose entre le soleil et le corps qu'elle doit échauffer, prive celui-ci de l'insolation directe, ce qui est un grave inconvénient. Ainsi, à quelque point de vue que l'on se place, on trouve que les lentilles sont d'un emploi difficile en même temps que désavantageux.

Au contraire, un bon réflecteur n'absorbe qu'une assez faible portion de la chaleur incidente et réfléchit tout le reste vers son foyer. De plus, s'il affecte la forme d'un cylindre parabolique, il est, comme nous l'avons déjà dit, facile à construire, peu coûteux et susceptible de recevoir un grand développement. Enfin, au lieu de priver de l'insolation directe les corps placés à son foyer, il ajoute plus ou moins, suivant sont étendue à la provision de chaleur que le soleil leur envoie. Or, ce sont là de sérieux avantages dans la question qui nous occupe ; et quand même les miroirs métalliques exigeraient des soins de propreté bien plus minutieux que les lentilles, il nous semble qu'on ne devrait pas hésiter à leur donner la préférence sur celle-ci. Mais, comme on l'a vu plus haut, il n'est pas impossible d'obtenir à peu de frais des feuilles métalliques assez inaltérables à l'air pour donner des résultats satisfaisants. Nous n'avons donc pas besoin d'insister davantage sur ce point.

CHAPITRE V

SOMMAIRE. — Histoire des miroirs ardents. — Optique d'Euclide. — Miroirs d'Archimède. — Miroirs d'Authemius de Tralles. — Travaux des Arabes. — — Histoire des Miroirs ardents au Moyen-Age, à la Renaissance.— Expériences de Magini, de Kircher, de Villette, de Dufay, de Buffon. — Supériorité des miroirs sur les lentilles, établie par l'expérience. — On ne doit pas s'en rapporter uniquement à la température quand il s'agit d'évaluer un effet calorifique. — Miroirs de Hœsen. — Moyen proposé par Ducarla pour préserver du refroidissement les corps placés au foyer d'un miroir ardent.

Les verres de forme lenticulaire ne paraissent pas avoir été connus des anciens, qui savaient cependant qu'un ballon de verre incolore peut, quand il est plein d'eau, concentrer les rayons solaires au point de produire une chaleur assez intense : car Pline nous apprend que quelques médecins se servaient de petits appareils de ce genre pour cautériser les chairs au soleil. L'origine des lentilles proprement dites remonte beaucoup moins haut, puisqu'on ne les voit apparaître que vers la fin du treizième siècle en Italie. Mais, il n'en est pas de même des miroirs ardents ; car, tout porte à croire que l'invention en est fort ancienne. Faut-il l'attribuer aux Egyptiens dont la civilisation atteignit de bonne heure un degré si élevé ? Faut-il remonter plus haut encore et en faire honneur aux Chaldéens adorateurs de Baal, c'est-à-dire du soleil ou du feu ? On l'ignore. Tout ce qu'on peut dire de plus certain à cet égard c'est que les miroirs de métal destinés à la toilette étaient déjà communs en Egypte à une époque reculée, puisque, d'après la Bible, Moïse fit une cuvette d'airain avec les mi-

roirs que les femmes Israélites avaient sans nul doute apportés de ce pays. Il est donc très-probable que les prêtres d'Héliopolis et de Thèbes dont les connaissances étaient d'ailleurs fort étendues, découvrirent de bonne heure l'usage qu'on pouvait faire de quelques-uns de ces miroirs pour concentrer les rayons du soleil. Au reste, un passage de Plutarque nous apprend qu'à Rome on se servait de miroirs ardents pour rallumer le feu sacré quand il venait à s'éteindre : et, comme le culte de Vesta était antérieur en Italie même à la fondation de Rome, il est à supposer que le rite en question avait également une origine fort ancienne. Ce qui frappe surtout dans la description que Plutarque donne des miroirs usités en pareil cas, c'est que la forme et la matière en sont telles qu'il faut admettre ou que les prêtres de Vesta possédaient les notions fondamentales de l'optique ou qu'une longue expérience leur avait servi de guide sur ce point. En effet, la forme de ces miroirs était celle d'un cône droit à base circulaire, engendré par la révolution d'un triangle rectangle isocèle autour d'un des côtés de l'angle droit. Or, c'est là, comme on l'a déjà dit, la meilleure disposition qu'on puisse adopter pour les réflecteurs coniques. Quant au métal employé à les construire, c'était l'airain : et, comme l'alliage de cuivre et d'étain auquel on donnait ce nom jouit à un très-haut degré de la propriété de réfléchir la chaleur, on ne sait lequel admirer du bonheur ou du discernement des prêtres du feu dans le choix de leurs instruments sacrés.

Le premier ouvrage où il soit parlé des miroirs ardents est le traité d'optique d'Euclide qui professait à Alexandrie environ 300 ans avant l'ère chrétienne. Le célèbre mathématicien grec donne à la fin de son ouvrage la théo-

rie des réflecteurs sphériques. Toutefois, il se trompe dans la détermination du foyer des rayons solaires, faute de regarder ces rayons comme étant sensiblement parallèles entre eux. Mais selon toute vraisemblance il eut au nombre de ses auditeurs un homme dont le génie devait bientôt féconder, tout en les redressant, les premiers aperçus du maître sous ce rapport. Ce fut Archimède le plus grand géomètre de l'antiquité. On ne possède que très peu de détails sur la vie de cet homme extraordinaire; mais on sait qu'il partit fort jeune de Syracuse sa patrie pour aller du temps d'Euclide étudier les sciences en Egypte et s'y distinguer plus tard par des découvertes utiles, telles que celle de la vis qui porte son nom. De retour dans son pays, Archimède y composa entre autres ouvrages remarquables un traité des miroirs ardents : et l'histoire rapporte que vers la fin de sa vie il put, dans une occasion mémorable, mettre en pratique ses connaissances sur ce point. En effet, la flotte romaine, commandée par Marcellus, étant venue mettre le siége devant Syracuse, Archimède profita, dit-on, de ce que les vaisseaux ennemis s'étaient fort approchés des murs de la ville pour y porter l'incendie en y concentrant les rayons solaires à l'aide d'un grand réflecteur. Ce fait, il faut le dire, bien que formellement attesté par d'anciens auteurs a souvent été révoqué en doute par les modernes. Mais la plupart des objections qu'on a faites à ce sujet aussi bien que la seule explication plausible qu'on ait pu donner de la conception d'Archimède se trouvent dans un écrit qui paraît avoir été longtemps ignoré et qui même de nos jours est assez peu connu. Nous voulons parler d'un fragment des paradoxes de mécanique d'Anthémius de Tralles, célèbre architecte,

qui mourut l'an 584 de notre ère après avoir élevé la superbe basilique de Sainte-Sophie à Constantinople. Ce précieux fragment se compose de quatre problèmes tous relatifs aux miroirs ardents, mais dont nous ne rapporterons ni le premier qui ne nous serait d'aucun usage, ni le quatrième, parce que c'est la théorie du miroir parabolique que nous avons donnée plus haut. Voici maintenant les deux autres problèmes d'Anthémius tels que Dupuy les a publiés dans le tome XLII des Mémoires de l'académie des inscriptions et belles-lettres.

PROBLÈME II.

« Construire une machine capable d'incendier, à un lieu donné distant de la portée du trait, par le moyen des rayons solaires.

« Ce problème paraît comme impossible, à s'en tenir à l'idée de ceux qui ont expliqué la méthode de construire ce qu'on appelle miroirs ardents, car nous voyons toujours que ces miroirs regardent le soleil, quand l'inflammation est produite, de sorte que si le lieu donné n'est pas sur le même alignement que les rayons solaires, s'il incline d'un côté ou d'un autre, ou s'il est dans une direction opposée, il est impossible d'exécuter ce qu'on propose par le moyen de ces miroirs ardents. D'ailleurs la grandeur du miroir, laquelle doit être proportionnée à la distance où il s'agit de porter le feu au point d'incendier, nous force de reconnaître que la construction, telle qu'elle est exposée par les anciens, est presque impraticable. Ainsi, d'après les descriptions qu'on en a données, on a raison de croire que le

problème proposé est impossible. Néanmoins, comme on ne peut pas enlever à Archimède la gloire qui lui est due, puisqu'on s'accorde unanimement à dire qu'il brûla les vaisseaux ennemis par le moyen des rayons solaires, la raison nous force d'avouer que par ce moyen même, le problème est possible. Pour nous, après avoir examiné la matière, après l'avoir considérée avec toute l'attention dont nous sommes capables, nous allons exposer la méthode que la théorie nous a fait découvrir, en faisant précéder quelques préliminaires nécessaires au sujet. »

PROBLÈME III.

« A un point donné d'un miroir plan, trouver une position, telle qu'un rayon solaire venant, selon quelque inclinaison que ce soit, frapper ce point, soit réfléchi à un autre point aussi donné.

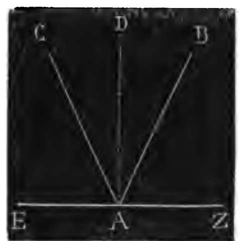


Fig.. 10

« Soit A le point donné, le rayon BA donné, selon une direction quelconque, et qu'il faille que le rayon BA, tombant sur un miroir plan et attaché à ce point A soit réfléchi au point C.

« Tirez du point A au point C la droite AC : divisez en deux parties égales l'angle BAC par la droite AD, et concevez le miroir plan EAZ dans une position perpendiculaire à la ligne AD ; il est évident par ce qui a été démontré que le rayon BA, tombant sur le miroir EAZ, réfléchira au point C ; ce qu'il fallait exécuter.

« Par conséquent aussi tous les rayons solaires également inclinés et tombant parallèlement à A B sur le miroir seront réfléchis par des lignes parallèlles à A C. Il est donc démontré que de quelque côté que se trouve le point C, dans quelque position qu'il soit à l'égard du rayon solaire, ce rayon sera réfléchi du même côté par le miroir plan. Mais l'inflammation ne s'opère par le moyen des miroirs ardents que parce que plusieurs rayons sont rassemblés en un seul et même lieu, et que la chaleur est condensée au sommet au point d'incendier. C'est ainsi que le feu étant allumé dans un lieu, les parties d'alentour et l'air ambiant conçoivent quelque chaleur proportionnée. Si donc nous concevons qu'au contraire tous ces degrés de chaleur soient rassemblés et réunis au milieu de cet endroit, ils y exerceront la vertu du feu dont nous parlons. Qu'il faille donc porter au point C, éloigné du point A de la distance que nous avons assignée, et y rassembler différents autres rayons par ce moyen des miroirs plans et et semblables, de manière que tous ces rayons, réunis après la réflexion, produisent l'inflammation; c'est ce qui peut s'exécuter à l'aide de plusieurs hommes tenant des miroirs qui, selon la position indiquée, renvoient les rayons au point C.

« Mais, pour éviter les embarras où jette l'exécution d'un pareil ordre prescrit à plusieurs personnes, car nous trouvons que la matière qu'il s'agit de brûler n'exige pas moins de vingt-quatre réflexions : voici la construction qu'il faut suivre. »

SOLUTION DU IIᵉ PROBLÈME.

Soit le miroir plan exagone ABCDEZ, et d'autres miroirs adjacents semblables, hexagones, et attachés au premier suivant les lignes droites AB, BC, CD, DE, EZ, par le plus petit diamètre, de manière qu'ils puissent se mouvoir sur ces lignes, au moyen de lames ou bandes appliquées qui les unissent et les collent les uns aux autres, ou à l'aide de ce qu'on appelle des charnières.

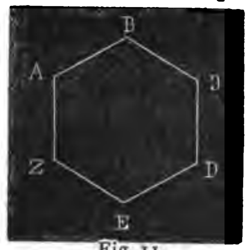


Fig. 11.

Si donc nous faisons que ces miroirs d'alentour se trouvent dans le même plan que le miroir du milieu, il est clair que tous les rayons éprouveront une réflexion semblable et conforme à la position commune de toutes les parties de l'instrument. Mais si, le miroir du milieu restant comme immobile, nous inclinons sur lui avec intelligence, comme cela est facile, tous les autres miroirs qui l'entourent, il est évident que les rayons qui en réfléchiront, tendront vers le milieu de l'endroit où est dirigé le premier miroir. Répétons la même opération, et aux environs des miroirs dont nous avons parlé, plaçant d'autres miroirs pareils, dont ceux d'alentour peuvent s'incliner sur le central, rassemblons vers le même point les rayons qu'ils reçoivent, de sorte que tous ces rayons réunis produisent l'inflammation dans le lieu donné.

« Mais, cette inflammation se fera bien mieux, si vous pouvez employer à cet effet quatre ou cinq de ces miroirs ardents, et même jusqu'au nombre sept, et s'ils sont entre eux à une distance analogue à celle de la matière à brûler,

de manière que les rayons qui en partent, se coupant mutuellement, puissent rendre l'inflammation plus considérable. Car si les miroirs sont dans un seul lieu, les rayons réfléchis se coupent selon des angles très-aigus, de sorte que tout le lieu autour de l'axe étant échauffé..... l'inflammation ne se fait pas au seul point donné.

« Il est donc possible par le moyen des miroirs ardents dont on a parlé, et dont on a décrit la construction, de porter l'inflammation à la distance donnée..... Aussi, ceux qui ont fait mention des miroirs construits par le divin Archimède n'ont pas dit qu'il se fut servi d'un seul miroir ardent, mais de plusieurs..... »

Tel est le document le plus certain qu'on puisse invoquer en faveur de l'histoire des miroirs ardents d'Archimède ; car, l'historien Tzetzès qu'on a l'habitude de citer à cette occasion comme une autorité n'a fait que s'inspirer sans le comprendre de ce passage d'Anthémius, ainsi que l'a fort bien prouvé Dupuy dans les notes qui accompagnent sa traduction. Espérons d'ailleurs qu'au lieu d'un simple fragment, on retrouvera quelque jour l'ouvrage entier d'Anthémius dans les manuscrits grecs ou arabes encore inédits, et qu'en puisant à ces mêmes sources on saura compléter le peu qui nous reste, soit du traité des miroirs ardents d'Archimède, soit de l'optique de Ptolémée qui florissait à Alexandrie au commencement du second siècle de notre ère.

Afin de ne rien omettre de ce qui concerne l'histoire des miroirs ardents chez les anciens, nous devons dire encore que, d'après Zonaras, l'empereur Anastase, assiégé dans Constantinople par Vitalien, dut son salut au mathématicien Proclus, qui par une combinaison de miroirs d'airain

porta le feu dans la flotte ennemie. Mais si l'on observe que Zonaras écrivait comme Tzetzès au douzième siècle, on ne peut guère accorder de confiance à son témoignage.

Il nous reste maintenant à parler de la théorie et des usages des miroirs ardents au moyen âge et dans les temps modernes. Inutile d'ajouter que nous insisterons beaucoup plus sur les données expérimentales que sur les autres détails historiques de la question.

Les arabes qui recueillirent avec tant d'ardeur l'héritage scientifique de l'Égypte et de la Grèce n'eurent garde de négliger l'étude des miroirs ardents. L'ouvrage qu'Hassan-ben-Haithem, mort en 1029, écrivit sur cette matière est malheureusement perdu; mais l'*Optique* d'Al-Hazen qui nous est parvenue nous donne une assez haute idée des connaissances des Arabes sur ce point. Al-Hazen, dans cet ouvrage, traite de la réflexion de la lumière et des miroirs caustiques : toutefois il se trompe avec Euclide sur la détermination du foyer des rayons solaires dans les miroirs sphériques concaves. Vers le même temps, les travaux des anciens sur la catoptrique portent également leur fruit en Occident, grâce aux efforts du polonais Vitellio et du moine anglais, Roger Bacon. Le premier compose, vers 1269, un ouvrage assez considérable où il donne la théorie de diverses espèces de réflecteurs. L'autre, ennemi déclaré de l'influence d'Aristote sur l'esprit scientifique de son temps, préconise l'expérience en matière de physique, et, joignant l'exemple au précepte à propos des miroirs ardents, en fabrique lui-même de très-bons en acier au prix de dix livres, monnaie de Paris. Mais bientôt son génie lui attire les persécutions de ses supérieurs; accusé de magie, il finit par expier dans une dure captivité le crime d'avoir devancé

son époque, et le mouvement intellectuel qu'il a provoqué s'arrête avec lui. Après la mort de ce martyr de la science en 1294, deux siècles s'écoulent pendant lesquels les essais que nous venons de mentionner semblent tomber peu à peu dans l'oubli ; mais à l'époque de la Renaissance, ils préoccupent de nouveau quelques esprits d'élite. En 1551, Oronce Fine, mathématicien français, publie un Traité du miroir ardent. Jérôme Cardan (1501-1576), célèbre médecin de Pavie, essaie également d'interpréter à sa manière l'expérience d'Archimède. Puis, Porta (1550-1615) propose à son tour, dans sa *Magie naturelle,* diverses solutions du même problème. Enfin, Marin Ghétalde, vers 1610, et Bettini, en 1636, ajoutent de savants commentaires aux écrits de leurs devanciers. Mais c'est en vain que ces auteurs s'épuisent à chercher des combinaisons ingénieuses pour concentrer au loin les rayons du soleil ; car tous raisonnent dans l'hypothèse que l'appareil d'Archimède était un miroir concave d'une seule pièce, et l'on a vu par ce qu'en dit Anthémius qu'il est à peu près impossible de satisfaire aux conditions du problème avec un pareil réflecteur, tant à cause des dimensions considérables qu'il faudrait lui donner que par suite des difficultés à vaincre pour lancer par ce moyen les rayons solaires dans une direction donnée. On peut ajouter qu'un miroir parabolique ou sphérique de peu d'étendue, ayant son foyer à la portée du trait, ne présenterait qu'une faible courbure ; en sorte que, fût-il travaillé avec le plus grand soin, il devrait encore être exempt des moindres déformations occasionnées dans les corps par la chaleur, ce qui est presque irréalisable. Il ne faut donc pas s'étonner que des juges compétents en cette matière, tels que Képler et Descartes, aient regardé comme

fabuleuse l'existence d'un miroir concave d'une seule pièce assez puissant pour remplir les vues d'Archimède. Si, quelques années plus tard, Kircher en étudiant la question sur son théâtre même, à Syracuse, ne doute pas qu'un miroir parabolique n'ait suffi pour incendier les vaisseaux romains à la faible distance où ils étaient des murs de la ville, il est bon d'ajouter que de son aveu même il ne put réussir à fondre un miroir de cette sorte, parce que le moule échauffé par le métal en fusion tendit constamment à prendre la forme sphérique.

Kircher fut mieux inspiré lorsque, guidé, sans doute, par le récit de Zonaras, ou par un passage de Vitellio relatif à Anthémius, il entrevit la possibilité de réaliser, au moyen d'une combinaison de miroirs plans, l'expérience attribuée au géomètre grec. Voici comment il rend compte d'une tentative qu'il fit à ce sujet :

« J'ai pris cinq miroirs; je les ai exposés au soleil, et j'ai trouvé que la lumière réfléchie par le premier me donnait moins de chaleur que l'insolation directe; avec deux miroirs, la chaleur augmentait notablement; trois me donnaient la chaleur du feu; quatre, une chaleur à peine tolérable, et celle que me causaient cinq miroirs dirigés vers un même point était tout à fait insupportable. J'en ai conclu qu'en multipliant les miroirs plans, et en leur donnant des directions convenables, j'aurais des effets, non-seulement plus intenses que ceux qu'on obtient au foyer des miroirs sphériques ou paraboliques, mais encore portés à une plus grande distance. Cinq miroirs me les ont donnés à 100 pieds (32^m,5). Quels phénomènes terribles n'aurait-on pas si l'on employait, par exemple, mille miroirs! Je prie donc instamment les

mathématiciens de tenter avec soin cette expérience, ils éprouveront qu'il n'est pas d'appareil catoptrique aussi propre que celui-ci à porter l'incendie au loin. » L'appel de Kircher ne devait être entendu qu'un siècle plus tard.

Si, laissant pour un instant de côté ce problème historique, nous jetons un coup d'œil sur les travaux des observateurs qui, moins préoccupés de l'origine que de la puissance des miroirs ardents, cherchaient à mettre cette dernière à profit, nous trouvons quelques faits intéressants à recueillir.

Au dire des alchimistes, les Arabes, pour opérer certaines distillations au soleil, se servaient de miroirs concaves d'acier poli fabriqués à Damas. C'est, peut-être, d'un pareil miroir qu'il s'agit dans le passage suivant de l'*Histoire naturelle* publiée, en 1551, par Adam Lonicer :

« Moyen par lequel on peut faire infuser dans l'eau diverses fleurs, de façon qu'elle en retienne l'odeur et les vertus.

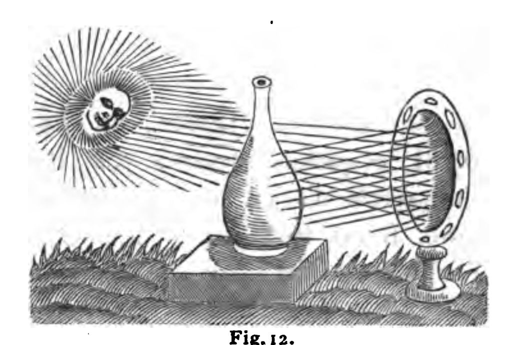


Fig. 12.

« Présente un miroir concave à un soleil ardent, puis place entre l'astre et le miroir le vase de verre où est

renfermée la substance, de telle sorte que les rayons solaires se réfléchissent du miroir au verre comme le montre la figure ci-jointe. »

Cinquante ans plus tard, l'alchimiste Libavius se sert encore, dans les mêmes circonstances, de miroirs sphériques, dont il fait, d'ailleurs, varier la position suivant la forme du vase à échauffer. Mais personne, à cette époque, ne contribue plus que Magini à mettre en faveur les miroirs ardents. Cet astronome célèbre ne se borne pas à publier, en 1619, un *Traité des effets admirables du miroir sphérique concave*, où il assigne, pour la première fois, avec exactitude, la position du foyer dans le cas des rayons solaires ; il construit lui-même de grands miroirs de cette forme, afin d'en faire hommage aux princes italiens et étrangers. A son exemple, Monfred Septala, contemporain de Kircher, fabrique un réflecteur parabolique de 3 pieds et demi (1^m,10) d'ouverture, qui brûle à la distance de quinze pas. Puis un opticien de Lyon, Villette, l'emporte sur tous ses prédécesseurs par la beauté de ses appareils. En 1662, il construit un premier miroir sphérique au sujet duquel le *Journal des savants* donne les détails qui suivent :

« La figure du miroir est ronde, du diamètre de 30 pouces (0^m,81) et quelque chose de plus. Il est bordé d'un côté d'un cercle d'acier, afin qu'il demeure dans sa juste figure. Il est facile de le remuer, quoiqu'il pèse plus d'un quintal (50 kilog.), et on le met aisément en toutes sortes de situations. Le point brûlant est distant du centre du miroir d'environ 3 pieds (0^m,97). Le foyer est large comme un demi-louis d'or. On y peut

passer la main, pourvu que ce soit avec précipitation; car, si elle demeurait le temps d'une seconde de minute, on serait en danger de se faire beaucoup de mal. Le bois vert prend feu dans un instant, de même que beaucoup d'autres corps. »

Voici quelques-unes des expériences rapportées par l'auteur de la lettre :

« Un petit morceau de fer de marmite s'est mis en goutte prêt à tomber à terre en 40 secondes.

« Une pièce de quinze sols a été percée en 24 secondes.

« Un jeton de laiton a été percé en 43 secondes.

« Un petit morceau de fer blanc a été percé en 6 secondes.

« Un morceau de cuivre rouge s'est mis en goutte prêt à tomber en 42 secondes.

« Un morceau de carreau de chambre s'est vitrifié et mis en bouteille en 45 secondes.

« L'acier dont les horlogers font leurs ressorts d'horloge s'est troué en 9 secondes.

« Un morceau de mortier s'est vitrifié en 52 secondes. »

Une autre lettre insérée dans le même journal, pour l'année 1679, donne les détails suivants sur les miroirs de Villette :

« Le premier qu'il fit fut acheté par Tavernier et présenté au roi de Perse, qui le garde comme une des plus rares et des plus précieuses curiosités qu'il ait. Le second fut vendu au roi de Danemarck, qui le fit acheter à Lyon, et Villette eut l'honneur de présenter le troisième au roi, duquel, après les expériences surprenantes qu'il en fit, il

reçut les éloges et la récompense qui étaient dus à son mérite et à son travail.

« Il avait 34 pouces (0^m,92) de diamètre : il vitrifiait, en un moment, la brique et les cailloux, de quelque qualité qu'ils pussent être. Il consumait, en un instant, les bois les plus verts, et les réduisait en cendres. Il fondait de même, en un instant, toutes sortes de métaux. Quelque dur que soit l'acier, il ne lui résistait pas mieux que les autres, et il se fondait de telle manière qu'une partie coulait, et l'autre se résolvait en étincelles qui formaient des étoiles irrégulières de la largeur d'une pièce de trente sols, mais si pénétrantes que rien ne peut exprimer l'activité et la violence de ce feu.

« Le quatrième est encore plus actif, plus grand, plus net et plus beau. Il a 43 pouces (1^m,16) de diamètre, 3 pouces et 1 ligne (0^m,08) de concavité. Son point brûlant où son foyer est éloigné de la glace de 3 pieds et 7 pouces (1^m,16). Il est de la largeur d'une pièce de cinq sols ou d'un sol marqué, et c'est là où se fait la réunion et l'assemblage de tous les rayons du soleil, et où paraissent les admirables effets du feu le plus violent et le plus actif du monde, si bien que la lumière, en cet endroit, est si brillante, que les yeux ne peuvent non plus la supporter que celle du soleil. »

Enfin les *Transactions philosophiques de 1719* donnent, en ces termes, la description d'un cinquième miroir de Villette et le détail des principales expériences faites avec cet instrument par Harris et Desaguliers :

« Ce miroir est concave, de 37 pouces (1 mètre) de diamètre, et forme le segment d'une sphère de 76 pouces (2^m,06) de rayon; son foyer est à la distance de

38 pouces (1^m,03). Le métal de ce miroir est composé de cuivre, d'étain et de bismuth : son reflet a quelque chose du cuivre jaune. La surface concave n'a que quelques pailles fort petites ; mais la surface convexe, qui est aussi polie, a quelques boursouflures.

« Nous avons exposé différents corps au foyer de ce miroir pour observer les changements qu'ils éprouvaient à ce degré de chaleur : nous avions soin de déterminer la durée de l'expérience sur une pendule à demi-secondes.

« Nous avons fait toutes ces expériences entre 9 et 12 heures du matin.

« Un morceau rouge d'une patère romaine commença à se fondre au bout de 3 secondes et fut prêt à couler au bout de 100.

« Une autre morceau de couleur noire commença à se fondre en 4 secondes, et fut prêt à couler au bout de 64.

« Une coquille fossile fut calcinée en 7 secondes et se trouva dans le même état au bout de 64.

« Du minerai de cuivre qui ne paraissait point contenir de métal fut vitrifié en 8 secondes.

« Des scories d'un martinet qu'on soupçonna du temps des Saxons furent prêtes à couler au bout de 29 secondes et demie.

« Le miroir s'étant échauffé eut graduellement moins de force dans les expériences suivantes :

« Du minerai de fer se dispersa d'abord, mais ensuite se fondit en 24 secondes.

« Du talc commença à se calciner au bout de 40 secondes et tenu précisément au foyer le fut au bout de 64.

« Une dent d'un poisson inconnu se fondit en 32 secondes et demie.

« Une pierre aurifère se brisa et commença à fondre au bout de 7 secondes et demie.

« Un demi-sou du roi Georges se fondit en 16 secondes ; de l'étain, en 3 secondes ; de la fonte de fer, en 16 secondes ; de l'ardoise, en 3 secondes.

« Une tuile mince se fondit au bout de 4 secondes et fut vitrifiée au bout de 80.

« Un os se calcina en 4 secondes, et fut vitrifié au bout de 33.

« Une émeraude se fondit en une substance semblable à une turquoise. Un diamant perdit les 7/8 de son poids.

Les miroirs de Villette étaient néanmoins inférieurs à celui que le baron de Tchirnhausen exécuta vers l'an 1687, et dont il donna la description dans les *Actes de Leipzig* de la même année. Ce miroir était fait d'une lame de laiton d'une épaisseur double de celle du dos d'un couteau ordinaire ; son diamètre était d'environ 3 aunes de Leipzig (1^m,70), et son foyer était éloigné de 2 de ces aunes (1^m,13). Voici les résultats les plus remarquables obtenus à ce foyer.

Le bois s'enflammait sur-le-champ, et le vent le plus impétueux ne pouvait l'éteindre. L'eau contenue dans un vase de terre entrait de suite en ébullition : les œufs qu'on y plongeait étaient cuits dans le moment, et pour peu que l'expérience vint à se prolonger, cette eau se réduisait en vapeur. Une masse de plomb ou d'étain, épaisse de 3 pouces (0^m,81) se fondit sur-le-champ et se mit à couler d'abord en gouttes, puis en un filet continu, de telle sorte que le métal se trouva percé de part en part au bout de deux ou trois minutes. Enfin des plaques de fer ou d'acier rougissaient, puis se trouaient à ce même foyer ; le cuivre

et l'argent y entraient en fusion; l'ardoise s'y transformait en un verre noir; la brique, en un verre jaune; la pierre ponce en un verre blanc, et les débris de creuset qui avaient résisté au feu le plus violent des fourneaux s'y vitrifiaient aussi.

Wolff, à qui nous empruntons ces détails, nous apprend encore qu'un ouvrier de Dresde, nommé Gœrtner, avait exécuté des miroirs de bois dont les effets ne le cédaient guère à ceux du miroir de Tchirnhausen; mais il ne donne aucun éclaircissement à ce sujet; seulement il ajoute que, d'après Traber, on peut construire un miroir ardent avec du bois et de l'or en feuilles; car, il suffit pour cela de faire tourner dans un morceau de bois bien sec et bien solide une calotte sphérique concave, de l'enduire uniformément de poix mélangée de cire et d'y appliquer des feuilles d'or de trois ou quatre doigts de largeur. On peut même remplacer les feuilles d'or par des fragments de glace sans que l'effet du miroir en soit trop affaibli.

Enfin, s'il faut en croire Wolff, ou plutôt le Père Zahn qui atteste le fait, Neumann, ingénieur à Vienne en Autriche, aurait exécuté, en 1699, un miroir concave de carton, recouvert intérieurement de petites lames de paille et capable de produire des effets assez intenses.

Cependant l'opinion de Descartes avait fini par prévaloir en France au point d'y faire regarder comme une fable l'histoire des miroirs ardents d'Archimède. Aussi, n'est-ce guère que soixante-quinze ans après la mort de l'illustre philosophe qu'un physicien français, Dufay, ose en appeler de ce jugement. Comme le Mémoire qu'il fait insérer à ce sujet dans le Recueil de l'Académie des sciences, pour 1726, nous intéresse à plus d'un titre, nous allons en analyser quelques passages.

Dufay parle d'abord des motifs qui le portèrent à entreprendre ce genre de recherches. Sa curiosité avait été vivement excitée par le récit des effets remarquables qu'on obtenait depuis quelque temps en Allemagne au moyen des miroirs conjugués, en sorte qu'il résolut de répéter lui-même ces expériences. Il installa donc vis-à-vis l'un de l'autre deux miroirs concaves dont les axes étaient en ligne droite, et, après quelques essais qui répondirent de mieux en mieux à son attente, il put constater que les rayons émis par des charbons ardents placés au foyer d'un de ces miroirs allaient allumer de la poudre au foyer de l'autre, même à la distance de 50 pieds (16 mètres).

Ce fut, d'ailleurs, cet appareil qui lui servit à reconnaître que l'intensité des rayons calorifiques était considérablement affaiblie par l'interposition d'une lame de verre mince entre les deux foyers, et que l'absorption de la chaleur par le verre n'était pas proportionnelle à l'épaisseur de celui-ci.

Afin d'étudier l'influence des mouvements de l'air sur la chaleur rayonnante, il recommença dans une chambre close sa première expérience : puis il fit transporter l'appareil en plein air sans modifier la distance des miroirs ; mais il ne trouva pas de différence entre les effets obtenus dans les deux cas, quelle que fût la violence du vent et dans quelque direction qu'il vînt rencontrer les rayons calorifiques.

Enfin il eut aussi recours à l'emploi de la chaleur solaire pour essayer d'obtenir l'inflammation à de grandes distances. La première expérience de cette nature qu'il tenta de réaliser paraît avoir été conçue par J.-B. Porta. Il s'agissait de recevoir les rayons du soleil sur un grand

miroir concave, puis de les lancer dans une direction parallèle à son axe au moyen d'un petit réflecteur parabo-

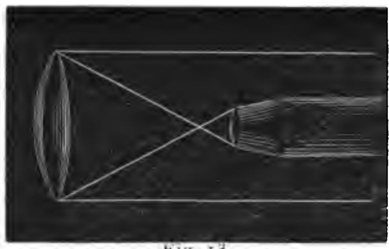


Fig. 13.

lique tronqué dont le foyer coïncidait avec celui du grand miroir, et de se procurer de la sorte une ligne combu-rante indéfinie. Comme on le voit, l'expérience était sédui-sante en théorie. Cependant, malgré tous ses efforts pour la mener à bonne fin, Dufay ne put y parvenir, à cause de l'extrême difficulté d'ajuster convenablement les deux mi-roirs, d'empêcher que le plus petit ne s'échauffât trop, de tenir compte du mouvement du soleil, etc. « C'est ainsi, ajoute-t-il, que la physique se refuse souvent aux vérités de la géométrie, qui supposent, pour l'ordinaire, les corps plus réguliers ou plus parfaits qu'ils ne sont. » Mais il réussit beaucoup mieux dans un autre essai du même genre qui le mit en mesure de contredire les partisans de Descartes. Il rapporte, en effet, qu'ayant reçu l'image du soleil sur un miroir plan d'un pied carré (0^{mq},1055), et l'ayant portée jusqu'à 600 pieds (195 mèt.) sur un miroir concave de 17 pouces (0^{m},46) de diamètre, il parvint à brûler des matières combustibles au foyer de ce dernier miroir. D'où il conclut, avec raison, que, puisqu'un fais-ceau de rayons solaires, après deux réflexions consécu-tives, conservait encore cette énergie à une aussi grande

distance, il est permis de ne pas juger absolument impossible l'expérience d'Archimède. Au reste, Dufay paraît avoir eu connaissance des essais de Kircher ou même du fragment d'Anthémius, puisqu'il ajoute à la fin de son Mémoire, que « quelques auteurs ont proposé de former un miroir d'un très-long foyer par un grand nombre de petits miroirs plans que plusieurs personnes tiendraient à la main, et dirigeraient de façon que les images du soleil formées par chacun de ces miroirs concourraient en un même point, et que ce serait peut-être la façon de réussir la plus sûre et la moins difficile à exécuter. »

Tel était l'état de la question lorsque Buffon tenta de la

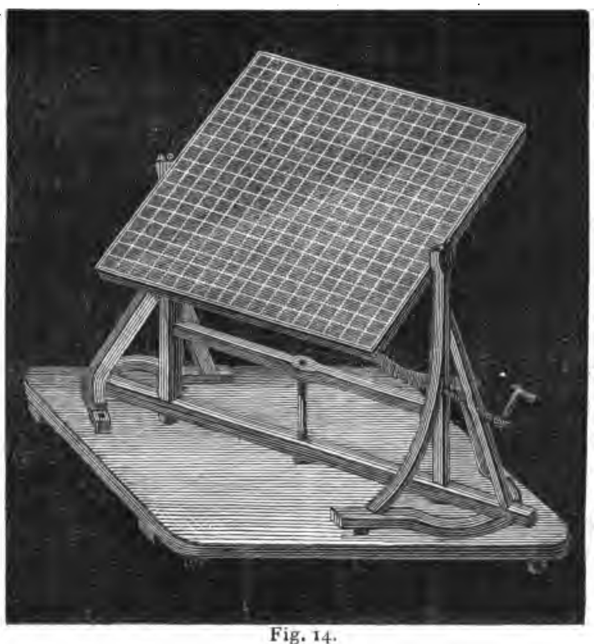


Fig. 14.

résoudre définitivement, et de rendre, de la sorte, aux

anciens la justice qui leur était due. Le miroir qu'il fit construire à cet effet était formé de 360 glaces portées par un châssis rectangulaire ayant 7 pieds (2^{m},27) de largeur et 8 pieds (2^{m},60) de hauteur. Ces glaces avaient chacune 6 pouces (0^{m},16) sur 8 (0^{m},22) ; elles étaient mobiles en tous sens et séparées les unes des autres par un intervalle de 4 lignes (0^{m},01). Il fallait une demi-heure pour les disposer de façon à faire coïncider les diverses images qu'elles donnaient du soleil ; mais l'appareil, une fois réglé, pouvait servir indéfiniment tant que la distance du foyer n'avait pas besoin d'être changée. Ce foyer était plus ou moins large selon qu'il se trouvait plus ou moins éloigné du miroir : à 50 pieds (16^{m}) de distance, il avait environ 6 pouces (0^{m},16) de diamètre ; à 150 pieds (49^{m}), il en avait 16 (0^{m},43). Pour de telles distances, la courbure du miroir était si faible qu'il paraissait être plan. On pouvait enfin diminuer à volonté le nombre des glaces.

Les résultats fournis par cet appareil dépassèrent l'attente de Buffon lui-même. En voici quelques-uns :

Le 10 avril 1747, après midi, 128 glaces mirent le feu à une planche de sapin goudronnée à la distance de 150 pieds : l'inflammation fut très-subite, et elle eut lieu dans toute l'étendue du foyer.

Le même jour, à deux heures et demie, on mit le feu à une planche de hêtre goudronnée en partie, et couverte en quelques endroits de laine hachée. L'inflammation se fit très-promptement : le feu devint si violent qu'il fallut, pour l'éteindre, plonger la planche dans l'eau. Il y avait 148 glaces, et la distance était de 150 pieds.

Le 11 avril, le foyer n'étant qu'à 20 pieds (6^{m},50)

de distance du miroir, il ne fallut que 12 glaces pour enflammer des matières combustibles. Avec 21 glaces, on mit le feu à une planche de hêtre brûlée en partie; avec 45 glaces, on fondit un gros flacon d'étain du poids de 6 livres ($2^{kg},9$), et avec 117 glaces, on parvint à fondre des morceaux d'argent mince, et à porter au rouge une plaque de tôle.

En poursuivant ses essais par un beau soleil d'été, Buffon réussit à enflammer du bois jusqu'à la distance de 68 mètres. Il fondit également tous les métaux et minéraux métalliques à 8, 10 ou 13 mètres.

Ces expériences concluantes démontraient, mieux que les meilleurs raisonnements, la possibilité du fait attribué par les anciens à Archimède. Cependant les résultats obtenus par Buffon eussent certainement été plus remarquables encore, s'il se fût servi de miroirs de métal au lieu de glaces étamées. Il avait été conduit, comme il l'explique lui-même, à donner la préférence à ces dernières parce qu'elles réfléchissent mieux la lumière que les métaux les plus brillants, et, comme il était loin de se douter que le verre fût opaque pour certains rayons calorifiques, il croyait se placer ainsi dans les meilleures conditions de succès. Or, en se laissant guider par l'expérience, plutôt que par une analogie trompeuse, il eût reconnu, sans trop de peine, que la plupart des métaux polis sont plus propres à réfléchir la chaleur que les glaces ordinaires. Maintenant qu'on sait argenter le verre, on met facilement ce fait en évidence de la manière suivante : On prend deux miroirs sphériques de verre exactement semblables, si ce n'est que l'un est argenté dans sa partie convexe, et l'autre dans sa partie concave, puis on

les fait agir dans les mêmes circonstances, et l'on constate que le second réfléchit plus de chaleur que le premier. Au surplus, Buffon, lui-même, conseille, pour ces applications, l'emploi des miroirs de métal de préférence à celui des glaces étamées, parce que celles-ci s'altèrent assez vite. « J'ai remarqué, dit-il, qu'en général les glaces fraîchement étamées, réfléchissent plus de lumière que celles qui le sont anciennement ; l'étamage, en se séchant, se gerce, se divise, et laisse de petits intervalles qu'on aperçoit, en y regardant de près avec une loupe, et ces petits intervalles donnant passage à la lumière, la glace en réfléchit d'autant moins. »

Si nous n'avions un tout autre but que celui de donner l'histoire complète des miroirs ardents, nous devrions encore parler d'un appareil de ce genre qui fut inventé, vers la fin du siècle dernier, par l'aéronaute français Robert, et qui présentait, sur le miroir de Buffon, l'avantage d'avoir un foyer susceptible de se déplacer rapidement ; mais ces nouveaux détails nous écarteraient trop de notre sujet : bornons-nous donc à recueillir encore quelques renseignements utiles.

Buffon parvint également à courber des glaces de manière à leur donner la forme sphérique et à les employer comme réflecteurs concaves. L'une de ces glaces, étamée par Bernières, sur sa face convexe, avait 46 pouces (1^m,25) de diamètre. C'était, au dire de Buffon, le plus beau miroir ardent qu'il y eût alors en Europe ; mais il y a peut-être là quelque exagération. Notons, cependant, que ce miroir donna de meilleurs effets qu'une lentille plus large exécutée antérieurement par Tchirnhausen. Au reste, on avait déjà constaté que le troisième miroir de

Villette brûlait plus rapidement, et avec plus de vivacité, que cette même lentille, bien qu'étant d'un diamètre moindre.

Jusqu'alors les miroirs métalliques avaient présenté dans leur construction, comme dans leur emploi, de graves inconvénients. Les uns, généralement formés d'un alliage de cuivre, d'étain et d'arsenic, étaient fondus tout d'une pièce : après les avoir jetés dans le moule, il fallait en creuser, puis en polir la concavité. Ils coûtaient, par conséquent, fort cher, étaient pesants, difficiles à manier, et, de plus, on ne pouvait leur donner de grandes dimensions. Les autres, construits en bois doré, avaient l'avantage d'être beaucoup plus légers que les premiers; mais ils réfléchissaient moins bien la chaleur, et s'altéraient très-vite. Hœsen, mécanicien de Dresde, sut, vers 1755, porter remède à ces diverses imperfections. Il forma ses miroirs paraboliques d'une charpente en bois dont il recouvrit la concavité de lames de laiton ou d'airain tellement polies, et si bien ajustées, qu'il était difficile d'en apercevoir les jointures, et il put ainsi livrer aux physiciens des appareils relativement légers, peu coûteux, d'un éclat suffisant et de dimensions assez considérables. L'un de ces miroirs avait 9 pieds et demi (3^m,08) de diamètre; un autre en avait 6 (1^m,95); si l'on observe, de plus, que la largeur de leur foyer était à peine d'un demi-pouce ($0,^m013$), on se figurera, sans peine, quelle devait être la puissance de ces instruments. Nous trouvons, dans les *Transactions philosophiques pour 1769*, les détails suivants sur l'un des moindres miroirs d'Hœsen :

« Un segment concave de paraboloïde formé de plu-

sieurs traverses d'un bois extrêmement dur, fortifiées en dedans par d'autres traverses qui les soutiennent et vont se réunir en un point, constitue la base du miroir. Il est couvert, à la partie concave, avec des feuilles d'airain de l'épaisseur de 1/8 de pouce (0^m,003). Ces feuilles sont jointes avec une telle exactitude qu'on voit à peine leur point de réunion. Le poli de ce miroir est de la plus grande perfection. Ce miroir se meut entre deux bras de bois demi-circulaires et mobiles autour d'un axe vertical fixé sur trois pieds garnis de roulettes. Le poids de cette machine est peu considérable, malgré sa grandeur; on peut aisément la mettre dans toutes les positions avec une seule main. Ce miroir a 16 pieds 4 pouces (4^m,95) de circonférence, 5 pieds 1 pouce (1^m,55) de diamètre, et 10 pouces (0^m,25) de concavité. »

Wolf rapporte, en ces termes, les résultats qu'il obtint au foyer de l'appareil :

« Une mine d'argent natif, dans une pierre talqueuse verte, se fondit en une seconde, sans aucune fumée. Au bout d'une minute, la pierre se trouva fondue en un verre vert où l'argent était disséminé en petites parcelles.

« Une mine de cuivre pyriteuse de Sahlfeld, avec de la malachite, coula, comme la précédente, au premier moment. A peine trois secondes s'étaient écoulées, que j'en vis tomber des gouttes rouges qui se trouvèrent, après s'être refroidies, du cuivre rouge fragile. La pierre s'était changée en un verre d'un rouge noir.

« Une mine d'étain polyèdre d'Altemberg coula au premier moment. Après une minute de fusion, beaucoup de grains d'étain s'étaient échappés, et la pierre, qui était de nature quartzeuse, s'était changée en un verre noir.

« Une galène de plomb, à gros cubes, se fondit en un clin d'œil, avec une fumée épaisse; au bout de trois secondes, il en coula du plomb malléable.

« Une hématite noire striée commença à se fondre au bout de quatre secondes, sans donner de fumée; au bout de deux minutes, je l'ôtai et je vis quelques globules de fer parfait qui lui étaient adhérents.

« De l'asbeste de Hongrie se changea, au bout de trois secondes, en un verre vert jaunâtre.

« Du gypse lamelleux d'Eisleben se calcina au bout de quatre ou cinq minutes : il se troua au foyer et se changea en un verre vert jaunâtre semblable au précédent.

« De l'ardoise se changea, au bout de deux secondes, en un verre noir.

« Du marbre noir se calcina au bout de quelques secondes, et, au bout d'une minute, il commença à se fondre en plusieurs endroits.

« Un grès ferrugineux se changea, au bout de trois secondes, en un verre noir.

« Une pistole d'Espagne se fondit en deux secondes; sa fonte parut noire.

« Une demi-couronne de Saxe commença à se fondre tout de suite; elle était déjà percée au bout de trois secondes.

« Un clou de fer d'une roue se fondit en trois secondes; il en coulait déjà, au bout de cinq, trois gouttes grosses comme de grands pois, qui allèrent se réunir; il paraissait qu'il s'était formé un verre de couleur verte. »

Ces exemples suffisent pour donner une idée des effets qui peuvent résulter de la concentration d'un grand nombre de rayons solaires dans un petit espace. Il est

bon d'ajouter, cependant, que la puissance de ces effets ne se mesure pas à l'élévation de température observée dans les corps qui se trouvent au foyer du miroir, et que, pour l'évaluer exactement, il faut tenir compte à la fois du poids de ces corps, de leur conductibilité, de leur capacité calorifique, de la quantité de chaleur qu'ils absorbent pour changer d'état, enfin du refroidissement qu'ils éprouvent dans l'air. Veut-on, par exemple, savoir lequel exige le plus de chaleur ou d'un centimètre cube de plomb pour se fondre, ou d'un centimètre cube de glace pour passer à l'état liquide et se réduire ensuite en vapeur? A ne s'en rapporter qu'aux apparences, on serait tenté de croire que la fusion du plomb est un effet calorifique plus difficile à réaliser que la vaporisation de l'eau, puisque celle-ci se produit à 100°, tandis que l'autre n'a lieu qu'à 335°. Mais un calcul très-simple, fondé sur les données de la physique, va nous conduire à une conclusion tout opposée. En effet :

D'une part, la capacité calorifique du plomb est de 0,039, ce qui veut dire qu'un gramme de plomb exige 39 millièmes d'unité de chaleur pour que sa température s'élève d'un degré. Si l'on suppose ce gramme de plomb à zéro, il lui faudra : $0{,}039 \times 335 = 13$ unités de chaleur pour atteindre son point de fusion; et comme il absorbera de plus 5 autres unités dans le passage de l'état solide à l'état liquide, il exigera finalement 18 unités de chaleur pour se fondre. Dans les mêmes circonstances, un centimètre cube de plomb, dont le poids est de 11 gr. 4, absorbe $18 \times 11{,}4 = 205$ unités de chaleur.

D'autre part, un centimètre cube de glace pèse un gramme environ; il absorbe 77 unités de chaleur pour

reprendre l'état liquide : il lui en faut de plus 100 pour atteindre son point d'ébullition, et 537 pour passer à l'état gazeux : total 706 unités de chaleur.

Ainsi, le second effet exige, pour se produire, environ trois fois plus de chaleur que le premier, bien qu'il nous paraisse moins extraordinaire au foyer d'un miroir ardent.

Cet exemple suffit pour montrer combien il faut se défier des apparences dans les appréciations de ce genre. Un calcul analogue permettra, d'ailleurs, de déterminer l'effet d'un miroir dont l'ouverture sera connue. Inutile d'ajouter que cet effet théorique sera toujours supérieur à l'effet réel, tant à cause de l'absorption d'une partie de la chaleur incidente par le miroir que par suite du refroidissement dans l'air des corps placés à son foyer.

Ducarla semble être le seul qui ait tenté de porter remède à ce dernier inconvénient, et nous ne pouvons mieux terminer ce chapitre qu'en faisant connaître la disposition qu'il donne à son appareil pour atteindre un pareil but.

« Pour accélérer, dit-il, et rendre plus violente la cumulation du feu, dans l'hémisphère massif, on peut emprunter la ressource de la catoptrique; par exemple, le système de verres combiné par M. de Buffon.

« ABCDA est un cylindre de bois creux, dont la base horizontale est BC, la hauteur AB, et plein d'eau, sur laquelle nage une espèce de gondole ou nacelle EFGE. Le cône tronqué EJLGE repose sur cette nacelle. Un plan vertical imaginaire et perpendiculaire au papier passe au point H, et coupe le cône tronqué en deux parties fort inégales. La section est une hyperbole : la portion du côté

de HE manque; PEQ est un miroir concave ou un système de petits verres plans. Il est disposé de manière que

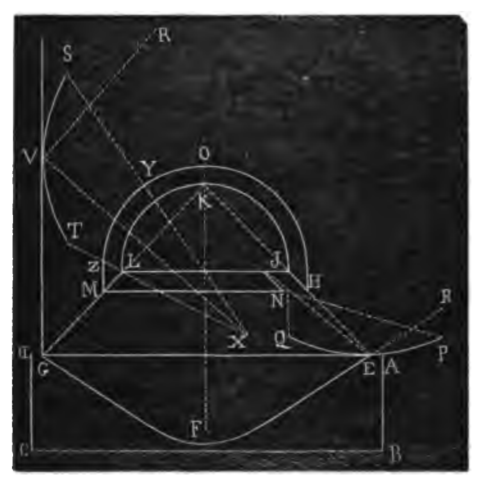


Fig. 15.

l'axe EN de réflexion est toujours dirigé, ramené vers le milieu d'un tube cylindrique oblique fort réfractaire JNH, sous et tout le long des parois du cône : en sorte que tout le feu réfléchi par le miroir PQ va frapper en J l'hémisphère massif JKLJ, qui l'absorbe et s'en pénètre. HOM est le plus grand bocal; tous les autres sont renfermés entre lui et l'hémisphère massif. NM est la grande calotte; toutes les autres sont renfermées de même entre elle et l'hémisphère massif.

« La nacelle EFGE, flottant sur l'eau, tourne soit par le soin de quelque ouvrier, soit par l'effet de quelque rouage. Le milieu E du miroir PQ est toujours dans le vertical du soleil et de l'axe FO. Ce miroir repose lui-même sur un arbre fixe horizontal, hausse ou baisse pour

renverser toujours l'axe de réflexion vers le milieu de l'orifice HN du tube HJN. Ces mouvements sont si simples, que je ne m'arrêterai pas à les diriger.

« On sent l'effet que doit produire cet arrangement. Le feu rayonnant, dirigé vers le tube HJN, va s'accumuler dans l'hémisphère massif, qui, étant d'un métal bon conducteur de feu, s'en pénètre...

« Ce feu projeté n'a souffert que l'altération produite par la réflexion du miroir PQ, qui sera du tiers ou du quart. L'hémisphère massif est donc la portion la plus échauffée de l'appareil. Il ne perd sa chaleur qu'à travers le système entier des bocaux, et il ne peut se refroidir qu'avec une extrême lenteur quand les bocaux sont nombreux : au lieu que le feu rayonnant qui passe à travers les bocaux est altéré par chaque bocal qu'il rencontre, et n'arrive à l'hémisphère massif, qu'après avoir été atténué. L'addition du miroir PQ donne donc à l'appareil une énergie et une permanence qu'aucun autre moyen ne peut lui communiquer.

« Cet effet est tel qu'on peut même négliger la transparence dans les bocaux, parce que le feu qu'ils transmettent à l'hémisphère massif ne peut entrer en aucune comparaison avec celui que lui renvoie le miroir. Les bocaux pourraient donc n'être composés que de porcelaine, ou autre terre, de tôle, etc., ce qui devient très-commode, très-économique et très-efficace : c'est le vrai moyen de mettre, en quelque sorte, sous clef le feu suprême.

« Si l'on veut profiter de toutes les facilités possibles pour avoir promptement une extrême chaleur, on ajoutera le moyen que voici :

« Soit GV un châssis quadrangulaire vu de profil, portant en V le miroir concave ou le système de miroirs plans TVS, mobile sur un arbre horizontal à demeure; ce châssis vertical est porté lui-même sur la nacelle EFGE. Le centre V de ce miroir est toujours dans le même vertical que le soleil et l'axe OF, mais du côté opposé au soleil et au miroir PQ ; la nacelle ne peut donc tourner sans que les deux miroirs ST, PQ se tournent aussi pour que l'aspect du soleil soit ce qui convient à leur destination.

« Le cône lumineux réfléchi SXT a pour axe XV ; son foyer X est presque à la surface de l'eau. Afin que la section YZ de ce cône oblique, faite par le grand bocal HOM, soit assez grande pour n'être pas altérée par la chaleur, il faut toujours que la largeur du cône entier TXS passe dans la capacité de l'hémisphère massif, car c'est lui, principalement, qu'on veut échauffer. A cela près, ce cône peut être encore plus irrégulier que dans la figure, puisqu'il nous suffit que tous ses rayons rencontrent l'hémisphère massif n'importe en quel endroit.

« Mais ce miroir ST suppose que les bocaux sont diaphanes. Les rayons qu'il relance vers l'hémisphère massif sont fort atténués par ces bocaux qu'il traverse, et ne peuvent donc produire qu'une chaleur très-bornée. Je présume donc que ce miroir ST sera rarement employé. Il vaut mieux tourner cette dépense vers le miroir PQ, qui ne peut jamais être assez grand, assez poli, si l'on aspire au feu le plus violent qn'on puisse loger. »

Il y a bien dans ce passage de Ducarla quelques assertions contestables : on pourrait même y signaler une espèce de contradiction entre ce qu'il dit du miroir PQ et

le conseil qu'il donne ailleurs d'éviter l'emploi des miroirs et de consacrer plutôt son argent à l'acquisition d'un grand nombre de bocaux de verre; mais il est inutile d'entrer dans de pareils détails, notre seul but étant de faire voir que Ducarla avait songé à préserver des influences atmosphériques les corps placés au foyer du miroir ardent.

CHAPITRE VI

Sommaire. — Examen comparatif des appareils de de Saussure, de Ducarla, de sir John Herschel. — Nouveau récepteur solaire; ses applications. — Action de la chaleur solaire sur l'air confiné; moyen d'emmagasiner les pressions qui en résultent. — Élévation des eaux par le moyen du soleil; jets d'eau. — Autres effets de l'insolation; ébullition de l'eau. — Marmite solaire; cuisson des viandes, des légumes. — Four solaire; cuisson du pain. — Distillation de l'eau-de-vie. — Cuisson des aliments à la vapeur. — Fusion des métaux. — Conséquences qui peuvent résulter de ces essais pour l'avenir de certaines contrées.

Si l'on compare entre eux les appareils de de Saussure et de Ducarla, on trouve que chacun d'eux avait ses avantages et ses inconvénients. Ainsi, les caisses rectangulaires ou hémisphériques de de Saussure offraient bien à la chaleur incidente une large surface d'admission; mais elles laissaient échapper en grand nombre ceux des rayons calorifiques qui, n'ayant pas rencontré de corps noirci sur leur passage, sortaient du verre à l'état de chaleur brillante comme ils y étaient entrés. Quant à l'héliothermomètre, non-seulement il se refroidissait beaucoup plus par ses parois en bois que par les glaces parallèles, mais il présentait encore l'inconvénient de n'avoir qu'une assez faible surface d'insolation par rapport à son volume, en sorte que pour lui faire recueillir une portion notable de chaleur incidente, il fallait nécessairement lui donner de vastes dimensions.

Ducarla, de son côté, comprit la nécessité de mettre un corps noirci sous les caisses de verre superposées et de l'isoler aussi complétement que possible, afin d'empêcher la chaleur de se perdre par les supports; mais il eut le

tort d'attacher trop d'importance à la multiplicité des enveloppes de verre et de prendre pour une amélioration réelle une complication dont le résultat le plus clair était d'éparpiller les rayons de soleil avant leur arrivée sur le réservoir central. Cette erreur ne lui permit pas non plus de tirer parti de l'heureuse idée qu'il avait eue d'ajouter aux effets de l'insolation directe dans son appareil ceux d'une portion plus ou moins grande de chaleur réfléchie, puisque l'efficacité d'un des miroirs qu'il propose de joindre à cet appareil devait être à peu près neutralisée par les réflexions multiples des rayons incidents sur les diverses enveloppes de verre. Quant à l'autre miroir il était trop difficile à orienter pour qu'on pût s'en servir avec avantage dans la pratique.

Il y a lieu de s'étonner que ces premiers essais n'aient pas fixé davantage l'attention ni provoqué des recherches plus suivies sur un point aussi important. On ne voit, en effet, qu'en 1834, sir John Herschel profiter d'un séjour de quatre ans au cap de Bonne-Espérance pour étudier la question dans des circonstances très-favorables, c'est-à-dire sous un beau ciel et par un soleil des plus ardents. Encore le savant astronome se borne-t-il, comme on le verra plus loin, à placer une boîte noircie dans un héliothermomètre assez simple; mais il ne cherche pas à accumuler sur la surface de chauffe une somme de chaleur plus grande que celle qui résulte de l'insolation directe et ne se préoccupe, comme Ducarla, que de supprimer les pertes de chaleur occasionnées par les supports.

Il est bon de rappeler cependant que là ne se bornèrent pas les tentatives de l'illustre observateur anglais, puisqu'il parvint à mesurer l'intensité calorifique de la radia-

tion solaire au cap de Bonne-Espérance, alors que Pouillet résolvait avec la plus rigoureuse exactitude le même problème à Paris. Les déterminations numériques obtenues dans cette circonstance par les deux savants physiciens, jointes à celle de l'équivalent mécanique de la chaleur, permirent enfin d'apprécier les trésors de force vive que le soleil envoie chaque jour à la terre. En même temps, les travaux de Melloni, MM. de Laprovostaye et Desains sur la transmission calorifique des corps réduits en lames minces, sur les pouvoirs réflecteurs des métaux,..... etc., faisaient entrevoir la possibilité d'emmagasiner à peu de frais les rayons du soleil. On ne devait guère tarder, par conséquent, à profiter d'aussi précieuses indications.

C'est en 1860 que j'ai commencé, pour ma part, à m'occuper de ce problème. J'ai dû songer d'abord à me procurer un récepteur solaire aussi satisfaisant que possible, c'est-à-dire susceptible d'emmagasiner rapidement les rayons de soleil sans être d'un volume ni d'un prix excessifs. Au début, je me servais de caisses en bois blanc de différentes formes, dont l'intérieur était noirci et dont la paroi vitrée se composait de trois glaces parallèles; mais j'ai bien vite constaté que ces héliothermomètres ne donnaient pas d'aussi bons résultats qu'une chaudière en cuivre noirci, placée sur un corps mauvais conducteur tel que le sable, la brique ou même le bois et recouverte de trois cloches de verre concentriques; car je recueillais ainsi la presque totalité des rayons tombant sur la cloche extérieure, c'est-à-dire une somme de chaleur assez grande relativement au volume de l'appareil; de plus la substitution de parois de verre à celles de bois

permettait de mieux concentrer les rayons obscurs. Cependant je n'étais pas encore affranchi de la nécessité de donner à la chaudière de vastes dimensions en vue de lui ménager une surface d'insolation convenable. C'est alors que j'ai profité de ce qu'un miroir de métal n'altère pas les propriétés de la chaleur solaire pour ajouter un réflecteur à l'appareil. Comme ce perfectionnement m'a permis de conserver à la chaudière et à son enveloppe des dimensions restreintes tout en laissant au réflecteur et par suite à la surface d'insolation une étendue en quelque sorte indéfinie, le but que j'avais en vue se trouvait à peu près atteint. L'expérience m'ayant appris en outre qu'avec un bon réflecteur une seule enveloppe de verre suffit, le récepteur solaire que j'ai fini par adopter se compose :

1° D'un miroir ou réflecteur cylindrique en plaqué d'argent ;

2° D'une chaudière en cuivre noirci installée à son foyer sur un corps mauvais conducteur ;

3° D'une seule cloche de verre ou d'un châssis vitré recouvrant la chaudière, afin d'y retenir comme dans un piége les rayons du soleil et ceux que rassemble le réflecteur.

L'aspect général de l'appareil varie d'ailleurs avec la nature des applications à réaliser.

Comme on voit, le récepteur solaire dont je viens de donner une idée, diffère à certains égards de ceux qui l'ont précédé. Il se distingue principalement des appareils de de Saussure et de Ducarla en ce que le réflecteur en est la pièce importante et que l'enceinte de verre n'a que l'épaisseur d'une vitre ou plutôt d'une glace. De plus, le réservoir métallique noirci qui fait défaut dans les caisses

superposées de de Saussure, et qui, selon Ducarla, doit être un corps massif d'une assez grande densité, est dans mon appareil, comme dans celui de sir John Herschel, un vase creux destiné à contenir de l'eau, de l'air ou toute autre substance. La surface d'insolation directe est d'ailleurs relativement plus grande dans ce nouveau récepteur que dans l'héliothermomètre, et la concentration de la chaleur obscure s'y fait pour le moins aussi bien. Enfin, et c'est là le point capital sur lequel on me permettra d'insister, ce dernier appareil ne peut recueillir une somme considérable de rayons incidents sans prendre beaucoup d'étendue, tandis que l'emploi d'un réflecteur métallique m'a permis de conserver au réservoir central des dimensions ordinaires sans nuire à l'intensité de la chaleur recueillie. Si l'on observe qu'au point de vue des applications, il importe moins de produire des températures élevées dans des corps d'un poids et d'une capacité calorifique assez faibles que d'accumuler beaucoup de rayons sur une surface de chauffe donnée, on reconnaîtra sans peine qu'une telle amélioration était indispensable pour rendre pratiques les récepteurs solaires. Je dois dire enfin que, sauf l'héliothermomètre, tous les appareils dont je viens de parler m'étaient inconnus lorsque j'ai réalisé le mien, en sorte que les données actuelles de la physique ont suffi pour me conduire directement au but.

Mes premières expériences ont eu pour objet l'action de la chaleur solaire sur l'air confiné. Comme l'appareil qui m'a servi dans cette circonstance est facile à construire, je vais en donner la description complète, et même indiquer les différentes recherches auxquelles on peut l'employer.

Cet appareil consiste en un vase cylindrique A de fer-blanc très-fort, à la partie supérieure duquel est soudée une chaudière en cuivre B noircie en dedans, et qu'il est utile de recouvrir en dehors d'une couche de noir de fumée déposée à la lampe. La capacité de la chaudière doit être aussi bien que celle du vase en ferblanc de trois ou quatre litres au moins. Ce dernier vase porte à sa partie inférieure deux ouvertures C et D fermées, la première par un robinet qu'un nœud de raccord relie soit à

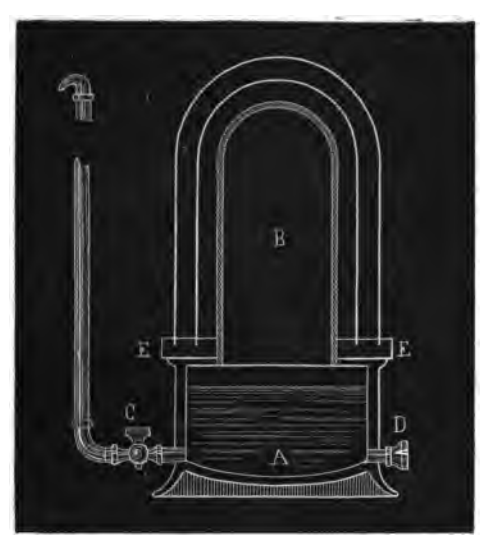


Fig. 16.

un tuyau d'ascension, soit à un bec de jet d'eau; la seconde par un bouchon à vis qui permet d'introduire de l'eau dans l'appareil.

Une couronne en bois E fixée à la base de la chaudière supporte deux cloches en verre mince ayant pour effet de livrer passage aux rayons solaires et de s'opposer à leur

sortie, dès que le cuivre noirci les a transformés en chaleur obscure. Enfin, un réflecteur cylindrique en ferblanc dont la ligne focale se trouve au centre de la chaudière en échauffe la partie qui reste dans l'ombre. Pour accroître l'effet de ce réflecteur on peut lui raccorder à angle droit une seconde lame cylindrique percée de manière à entourer la base de la cloche extérieure, ou lui adjoindre un miroir conique formant collerette autour de cette même base.

Veut-on maintenant faire travailler la chaleur emmagasinée par l'appareil? Il suffit pour cela d'emplir d'eau le vase en ferblanc, de laisser l'air confiné dans la chaudière à la température et à la pression ordinaires, puis d'exposer au soleil l'appareil muni de ses cloches de verre et de son réflecteur. Le gaz confiné s'échauffe alors très-vite, et, comme il ne peut, à cause de sa faible conductibilité, transmettre à l'eau la chaleur qu'il reçoit, il tend de plus en plus à se dilater. L'eau subit donc un accroissement de pression en vertu duquel elle monte dans le tuyau d'ascension, soit pour y atteindre une hauteur capable de faire équilibre au ressort de l'air confiné, soit pour jaillir à l'extrémité libre du tuyau quand il est trop court. De là, par conséquent, un certain travail engendré par la chaleur solaire.

Remarquons toutefois que, si la paroi de cuivre était en contact avec l'eau, les choses se passeraient autrement. Car, la chaleur incidente se propageant alors aussi bien dans l'eau que dans l'air confiné, la physique nous apprend que le liquide en absorberait beaucoup plus que le gaz pour s'échauffer au même degré que lui. L'élévation de température serait donc très-lente d'un côté comme de

l'autre, en sorte que l'effet dont je viens de parler se ferait attendre assez longtemps. C'est pour cette raison que le vase destiné à contenir le liquide doit être formé d'une matière peu conductrice. J'ai cru devoir adopter le fer-blanc à cause de sa conductibilité beaucoup moindre que celle du cuivre et de la facilité avec laquelle on le travaille; mais le bois eut été préférable.

Ainsi, pour faire fonctionner l'appareil dans de bonnes conditions, il faut que le vase en ferblanc soit à peine rempli d'eau. Comme l'air confiné doit être aussi froid que possible, il est bon de préparer l'appareil à l'ombre, d'agiter l'eau de manière à mouiller jusqu'à l'intérieur de la chaudière et d'ouvrir le robinet par intervalle afin de laisser rentrer l'air si la pression n'est pas la même au dedans qu'en dehors. Cela fait, on ajuste le tuyau d'ascension[1], et le réflecteur : on recouvre la chaudière des cloches de verre, et l'on place le plus rapidement possible l'appareil au soleil dans un endroit bien exposé. L'air confiné s'échauffant immédiatement, l'eau s'élève dans le tuyau d'ascension avec une vitesse très-appréciable. Si l'on veut accroître cette vitesse et produire un jet assez vigoureux, on ferme le robinet et on laisse chauffer l'appareil de dix à quinze minutes, mais ce qu'on gagne de la sorte en vitesse se trouve perdu pour le rendement. Dès que l'air confiné touche à sa limite d'expansion et que l'écoulement s'arrête, on ferme le robinet : on enlève cloches et réflecteur, puis on agite l'appareil à l'ombre afin d'en refroidir l'air par un contact plus intime avec l'eau qui reste. Après quoi, on place l'appareil au repos, toujours à l'ombre, on relâche un peu le nœud de raccord de manière à pouvoir incliner le tube horizontalement et en

plonger l'extrémité libre dans un vase plein d'eau : enfin, on ouvre le robinet. La pression atmosphérique force alors le liquide à se précipiter du vase dans l'appareil qui se remplit d'autant mieux que le refroidissement de l'air y a été plus parfait. On referme ensuite le robinet, on replace le réflecteur et les cloches ; puis, on substitue l'orifice de jet d'eau au tuyau d'ascension et l'on expose l'appareil au soleil pendant un quart d'heure environ avant de laisser jaillir le liquide.

On peut aussi transformer l'appareil en aspirateur. Il suffit pour cela de le mettre vide au soleil, en laissant le robinet ouvert et le bouchon à vis fermé. L'air qu'il contient se raréfie alors en s'échauffant : après dix minutes d'insolation on ferme le robinet ; on adapte le tube de manière à ce que son extrémité libre plonge dans un vase plein d'eau placé au-dessous de l'appareil ; puis, on laisse celui-ci se refroidir à l'ombre. Au bout de quelques instants, on ouvre le robinet et l'on voit monter l'eau dans le tube jusqu'à ce qu'elle ait réduit l'air de la chaudière à son volume normal.

Au lieu de couvrir tout en commençant la chaudière de ses cloches, il n'est pas inutile de constater que, par un temps calme, le travail produit est déjà notable même quand la paroi noircie reste à nu, et qu'il s'accroît par degrés à mesure qu'on préserve cette paroi du refroidissement en lui superposant les cloches l'une après l'autre.

Enfin, lorsqu'on veut emmagasiner la pression qui se développe dans l'appareil, on en fait arriver l'eau dans un vase clos renfermant de l'air, et le gaz comprimé par l'irruption du liquide conserve son ressort jusqu'à ce qu'on lui laisse la liberté de se détendre.

Il faut d'ailleurs se garder de mastiquer les cloches sur leur support, parce qu'il y a double avantage à laisser les couches d'air qu'elles interceptent en communication directe avec l'atmosphère. En effet, la vapeur d'eau que ces couches d'air contiennent pourrait, en s'échauffant avec elles dans une enceinte bien close, sinon faire éclater les cloches, du moins les arracher de la couronne. De plus, lors même que cette vapeur resterait, comme on le remarque au début de chaque expérience, attachée sous forme de gouttelettes aux parties les plus froides du verre, elle s'opposerait fortement à la transmission de la chaleur incidente. Il faudrait donc, tout en fixant les cloches sur leur support, avoir la précaution de dessécher les couches d'air interceptées. Mais, le moyen le plus simple de se débarrasser de cette vapeur gênante est de lui ménager à la base des cloches une issue dans l'atmosphère, où elle se dissout aussitôt que la température du verre atteint un degré convenable.

De tous les appareils que j'ai fait construire sur le modèle précédent, le plus grand avait un réservoir à air de dix litres et un tuyau d'ascension formé de tubes en verre d'un mètre de long et d'un centimètre de diamètre intérieur. Il m'a donné en 1861, au soleil d'Alençon, les résultats suivants :

L'eau du vase en ferblanc, refoulée par l'air confiné s'est élevée vers le milieu du jour, dans le tuyau d'ascension, à la hauteur de six mètres au-dessus de son niveau primitif, avec une vitesse de cinq à six millimètres par seconde. La colonne liquide montait instantanément dès que les rayons solaires tombaient sur les cloches, soit directement, soit par réflexion : elle s'arrêtait dès qu'une

ombre venait à se projeter sur l'appareil et le moindre nuage passant sur le soleil la rendait stationnaire ou la faisait baisser. Le vent lui imprimait des oscillations sans paraître nuire à l'échauffement de la chaudière. Le mouvement ascensionnel de l'eau commençait dès le lever du soleil et se produisait encore au moment de son coucher. Par un temps calme, la colonne soulevée était de deux mètres avant que le réservoir fût couvert de ses cloches.

En réduisant à deux mètres la longueur du tuyau d'élévation, le débit de l'appareil a été de deux litres et l'écoulement durait dix minutes. Lorsque cet écoulement venait à cesser, le jet d'eau fonctionnait encore et rendait de deux à trois litres. Ce jet d'eau fournissait de cinq à six litres quand on le faisait jouer seul, et sa hauteur initiale dépassait deux mètres.

Le réflecteur en ferblanc avait près d'un demi-mètre carré d'ouverture : aussi, malgré la diminution d'éclat qu'il subissait à la longue, amenait-il assez rapidement la température de la chaudière à 150°, comme on pouvait s'en assurer en adossant à la paroi de cuivre un thermomètre à boule noircie placé tantôt du côté du réflecteur, tantôt du côté du soleil. Quant à l'eau, elle restait froide : ce qui toutefois n'empêchait pas la vapeur de se former et d'ajouter sa pression à celle de l'air échauffé, car l'appareil ne fonctionnait jamais aussi bien que lorsqu'on avait pris soin de mouiller avant l'expérience l'intérieur de la chaudière. En revanche, les causes de déperdition de travail ne faisaient pas défaut. La chaudière n'était pas suffisamment isolée ; une partie de sa chaleur passait dans l'eau par la paroi de ferblanc ; l'air confiné lui-même

devait se dissoudre en assez grande proportion dans le liquide. Enfin, l'appareil accusait par des déformations visibles la puissance des pressions intérieures qu'il avait à subir.

Quoi qu'il en soit, un travail d'environ quatre kilogrammètres effectué en dix minutes par un volume d'air de dix litres dans des circonstances peu favorables; une pression de plus d'une demi-atmosphère recueillie sans autres frais que ceux d'installation de l'appareil; enfin, la production d'une température assez élevée sur une surface de chauffe dont l'étendue est en quelque sorte illimitée, étaient des faits de nature à m'encourager dans mes recherches. Mais le peu de temps dont je pouvais disposer et les inconvénients d'un climat qui n'était guère propice à de semblables essais ne m'ont pas toujours permis de remplir cette tâche au gré de mes désirs.

Je dirai seulement qu'un autre appareil de mêmes dimensions que le précédent, mais construit avec beaucoup plus de soin et muni d'un réflecteur en plaqué d'argent d'un demi-mètre carré d'ouverture, donnait au bout de vingt minutes d'insolation un jet d'eau dont la durée était d'une demi-heure et la hauteur initiale de $3^m,50$ à 4^m.

Le volume d'air employé dans les essais que je viens de mentionner n'étant pas très-considérable, il y a lieu de se demander si l'échauffement d'une grande masse gazeuse serait assez rapide pour donner, toutes choses égales d'ailleurs, des résultats en rapport avec cette masse. Bien qu'en pareil cas l'affirmation ait pour elle la vraisemblance, je me garderai de rien avancer à cet égard, n'ayant pas eu l'occasion de vérifier ce fait. Dans les

appareils que j'ai successivement employés, l'air confiné n'avait pas toujours le même volume ; je n'ai cependant jamais constaté de différence appréciable dans la vitesse d'échauffement de la masse gazeuse. Mais, comme je n'opérais que sur des volumes d'air variant de deux à dix litres, je ne pouvais rien conclure de là. Le seul fait expérimental qu'il m'ait été possible de recueillir sur l'échauffement d'une grande masse gazeuse est le suivant. A l'usine à gaz d'Alger, dans les premiers temps de son installation, le travail du gaz échauffé par le soleil était tel que les gazomètres s'élevaient durant le jour de manière à paraître pleins, pour s'affaisser par l'effet du refroidissement aux approches de la nuit : en sorte qu'il a fallu le charger d'un grand poids pour éviter le retour d'une pareille déception. Ce fait tendrait à prouver que la chaleur se propageait assez vite dans toute l'étendue de la masse gazeuse : il est, au reste, d'un bon augure pour les applications mécaniques de la chaleur solaire, puisque les réservoirs métalliques où le soleil produisait d'aussi curieux effets étaient simplement exposés à l'air libre.

Le calcul du travail engendré par l'échauffement d'une grande masse gazeuse fournit d'ailleurs des résultats qui mériteraient à eux seuls d'être contrôlés par l'expérience. Ainsi, en admettant seulement que la capacité de la chaudière en cuivre soit d'un mètre cube, que l'élévation de température de l'air confiné soit de 100° et qu'enfin la section du tuyau d'ascension soit d'un décimètre carré, on trouve que la colonne liquide soulevée par la dilatation du gaz est de $6^{m},50$; que le travail correspondant est de de 217 $^{kgm.}$, et qu'en réduisant à 2^{m} la hauteur du tuyau

d'ascension ce même travail est d'environ 420 ^{kgm}.

Il faudrait évidemment, pour les essais en grand, substituer aux cloches de verre des châssis vitrés, mais l'expérience prouve que la concentration de la chaleur solaire ne se trouve pas sensiblement diminuée par ce changement. On peut même se contenter, comme je l'ai déjà dit, d'une seule enceinte vitrée à la condition de donner au verre une épaisseur suffisante. J'indiquerai plus loin le parti qu'il y aurait à tirer dans les contrées méridionales des faits que je viens de signaler. Je me borne, pour le moment, à dire qu'en vue de ces mêmes applications j'ai cherché s'il ne serait pas possible de remplacer instantanément l'air échauffé de l'appareil décrit plus haut par de l'air froid capable d'agir à son tour, mais que le résultat de mes recherches a été complétement négatif. En effet, après avoir substitué aux cloches de verre d'autres cloches percées à leur sommet de manière à laisser passer une longue cheminée qui communiquait au moyen d'un robinet avec le haut de la chaudière, j'ai vu qu'il suffisait d'ouvrir ensemble ce robinet et le bouchon à vis pour obtenir un tirage très-sensible, mais que, les deux ouvertures étant brusquement refermées, l'air confiné ne conservait presque plus de ressort : d'où il fallait conclure qu'il ne s'était que bien imparfaitement renouvelé.

Le champ d'observations qui s'ouvrait devant moi était assez vaste pour me permettre de diriger mes recherches sur plusieurs points différents. En même temps que j'étudiais l'effet des rayons solaires sur l'air confiné, je m'occupais du projet d'utiliser cette source précieuse de chaleur au profit des besoins ordinaires de la vie.

On a vu que les alchimistes se servaient déjà de miroirs d'acier poli pour concentrer les rayons du soleil dans des vases de verre renfermant certaines liqueurs, et que Tchirnhausen, en plaçant au foyer de son grand réflecteur un vase de terre contenant de l'eau, parvint à faire bouillir le liquide en plein air et même à le vaporiser complétement dans un temps assez court. De Saussure avait également eu l'idée de profiter de la concentration des rayons solaires sous des vitres parallèles, pour opérer quelques décoctions ou distillations n'exigeant pas un degré de chaleur fort supérieur à celui de l'eau bouillante; mais il ne mit pas ce projet à exécution. Ce serait d'ailleurs une erreur de croire que dès l'instant qu'on pouvait réaliser dans l'héliothermomètre une température de 160°, il était facile d'obtenir au soleil, dans des conditions essentiellement pratiques, l'ébullition de l'eau, la distillation de l'alcool,... etc. J'ai déjà dit qu'on ne doit pas s'en rapporter uniquement aux indications du thermomètre, quand il s'agit de conclure à la possibilité de certains effets calorifiques : je le répète encore, afin de prévenir toute méprise à cet égard. Ainsi, un héliothermomètre dont la paroi vitrée a, par exemple, un décimètre carré de surface, peut accuser une température fort supérieure à 100° dans son enceinte noircie, et néanmoins dix heures d'insolation ne suffiront pas pour lui faire amener à l'ébullition un décimètre cube d'eau prise à la température ordinaire, tant ce liquide exige de chaleur pour bouillir et surtout pour se vaporiser! Ce furent peut-être des considérations de ce genre qui empêchèrent de Saussure de poursuivre ses essais. Cependant, comme il savait par expérience que l'intensité de la radiation solaire

est très-grande à la cime des montagnes et que l'air raréfié n'y suffit qu'à peine pour entretenir la combustion, s'il avait pu se procurer un appareil commode pour faire bouillir l'eau et faire fondre la glace au soleil, il n'eût pas manqué de s'en servir lors de ses dernières excursions dans les Alpes. Qu'on en juge par ce passage du compte-rendu de sa seconde ascension au sommet du Mont-Blanc !

« L'esprit de vin brûla très-bien, dit-il, mais il fallut une demi-heure pour faire bouillir l'eau, tandis qu'au bord de la mer il ne fallait que 12 ou 13 minutes, quoique la chaleur (de l'air) dût y être de 12 degrés plus grande. A Genêve, il faut 15 ou 16 minutes.

« J'avais fait porter un réchaud et du charbon pour le cas où la lampe viendrait à se déranger, je ne m'en servis pas pour mon expérience ; mais nous en fîmes continuellement usage pour faire fondre la neige et avoir ainsi de de l'eau, dont nous étions extrêmement avides. On était obligé d'animer continuellement le charbon par le moyen du soufflet, sans quoi il s'éteignait au moment même. »

Les expériences de de Saussure furent reprises de 1834 à 1838 au cap de Bonne-Espérance par sir John Herschel. Le savant astronome ne fit que simplifier un peu l'héliothermomètre, l'enfouir dans le sable et en agrandir la paroi vitrée ; mais en recueillant à l'aide de cet instrument les rayons d'un soleil presque vertical au moment du solstice d'hiver, c'est-à-dire pendant l'été de ces contrées, il obtint, comme on va le voir, d'assez curieux résultats.

« Lorsque la chaleur envoyée par le soleil se trouve confinée, retenue et contrainte par là de s'ajouter à elle-

même, la température s'élève d'une manière vraiment remarquable. Ainsi, une petite boîte en acajou, noircie en dedans, fut fermée par une vitre coupée de grandeur convenable, mais ajustée sans mastic, et on l'exposa simplement au soleil de manière que les rayons vinssent tomber d'aplomb sur la vitre : un thermomètre placé dans la boîte indiqua :

Le 23 novembre 1837. . . .	65° cent.
Le 24 — — . . .	63°, 66°, 67°, etc.

« On accumula du sable tout autour de la boîte, pour empêcher le contact de l'air froid ; on vit alors la température s'élever :

Le 3 décembre 1867, à. . . . 81°.

Enfin, quand cette boîte, avec le thermomètre qu'elle contenait, fut placée sous un châssis en bois bien garni de sable sur les côtés, et fermé aussi par une feuille de verre à vitres (ce qui fait en tout deux cloisons vitrées), la température atteignit :

Le 3 décembre 1867, à	1 h.	30 m.. .	97°
— —	1	50 . . .	103°
— —	2	44 . . .	103°

et cela pendant que la brise soufflait sur l'endroit où se trouvait exposé l'appareil. On répéta l'expérience de la même façon, le 5 décembre, et l'on observa :

à 0 h.	19 m.	107°
0	29	110°
1	15	115°
1	57	120°
2	57	116°

« Voyant ces températures dépasser le point d'ébullition de l'eau, on s'amusa à faire quelques expériences avec des œufs, des fruits, de la viande, etc.... qu'on exposa au soleil de la même façon, le 21 décembre et les jours suivants, et tout cela se trouva parfaitement cuit au bout d'un temps qui ne fut pas très-long ; les œufs étaient durs, et le dedans en était friable. On prépara aussi une fois une assez forte étuvée de viande et de légumes, dont les assistants se régalèrent non sans lui trouver un goût excellent. Que l'on augmente le nombre des châssis enveloppants, qu'on les fasse en cuivre noirci à l'intérieur, qu'on les isole les uns des autres par des supports en charbon de bois, qu'on ait soin de tamponner le vase extérieur avec du coton, et que de plus on l'enfouisse dans du sable sec, et je ne doute pas qu'on arrive à une température voisine de l'ignition, et cela, comme on voit, sans recourir à l'emploi de lentilles. »

(Résultats des observations astronomiques faites au cap de Bonne-Espérance.)

Sir John Herschel ne semble pas avoir essayé d'obtenir au soleil l'ébullition d'un volume d'eau, même très-faible ; mais, en rendant compte des expériences précédentes, M. Babinet a fait observer qu'on aurait dû depuis longtemps s'occuper de cette question.

« Il est étonnant, dit le savant académicien, que dans les pays à ciel très-serein, comme l'Egypte, l'Arabie, la Perse, où le combustible est très-rare, on n'ait pas songé à utiliser les rayons du soleil concentrés sous des vitres ou par des verres où des miroirs ardents. Avec une lentille de deux ou trois décimètres de diamètre, fût-elle même mal travaillée, on fait bouillir de l'eau au soleil

presque instantanément. Un pareil verre ardent s'achèterait au poids et ne coûterait guère plus qu'un pareil poids de vitre : au reste, avec quelques châssis vitrés, on voit qu'on ferait, vers midi, un vrai four à cuire le pain et la viande avec le soleil des tropiques. Avant son expérience en grand, sir John Herschel s'était assuré qu'un thermomètre placé dans la même localité se soutenait pendant des heures entières à un degré supérieur à ce qu'il fallait pour cuire de la viande avec des assaisonnements. »

A l'époque où M. Babinet appelait ainsi l'attention publique sur ces importantes questions, mes expériences au soleil d'Alençon et de Rennes m'avaient permis depuis deux ans de les résoudre au moyen d'appareils très-simples, et le plaisir de me trouver ainsi en conformité de vues avec le savant physicien n'a pas été ma moindre récompense. Je dois dire cependant, que, loin de partager la prédilection que semble avoir M. Babinet pour les lentilles de verre, je les ai constamment exclues de mes appareils. Comme je l'ai déjà dit, ces instruments sont très-propres à produire de hautes températures tant qu'on se borne à opérer sur des parcelles de matière; mais, dès qu'il s'agit d'échauffer à un degré convenable des corps volumineux et d'une assez grande capacité calorifique, les lentilles de verre ne suffisent plus, parce qu'elles ne préservent pas ces corps du refroidissement et qu'elles consomment en pure perte, à cause de leur épaisseur, une portion notable de chaleur incidente. Je n'en citerai d'autres preuves que les expériences de Rumfor. Quant aux résultats obtenus à l'aide d'un réflecteur et d'une chaudière noircie, protégée contre le refroidissement par une simple paroi vitrée, on jugera d'après le résumé que je vais en donner, s'ils

peuvent ou non soutenir sous tous les rapports la concurrence avec ceux que fourniraient même de fortes lentilles.

J'ai commencé par faire chauffer de l'eau en assez faible quantité dans un vase de cuivre noirci en dehors. Je plaçais le vase sous trois cloches de verre concentriques. et j'y projetais la chaleur au moyen d'un réflecteur en fer-blanc fermé de deux lames cylindriques soudées à angle droit. L'une de ces lames était verticale, l'autre horizontale : celle-ci portait le vase en cuivre et les cloches de verre. Le liquide mettait assez longtemps pour atteindre 100°. Encore l'abondance des gouttelettes de vapeur condensée qui se déposaient sur les cloches empêchait-elle de le voir bouillir. Afin de m'assurer qu'on pouvait réaliser de la sorte des températures même supérieures au point d'ébullition de l'eau, j'ai remplacé le liquide par un bâton de souffre et j'ai fondu ce corps sans difficulté. Seulement les cloches perdaient encore dans ce cas de leur transparence en se couvrant de vapeurs sulfureuses condensées. Mais si l'on enlevait rapidement ces cloches on trouvait le soufre en fusion et par conséquent à la température de 116°.

En installant sur le même réflecteur une chaudière en cuivre ayant la forme d'un dé à coudre, et en la recouvrant de trois cloches de verre concentriques, je me suis procuré sans plus de frais un four portatif où les fruits, les pommes de terre, la viande et le pain cuisaient parfaitement. La croûte du pain était dure et caramélisée comme au four ordinaire. Une chaudière en fer battu pouvait d'ailleurs remplir l'office de la chaudière en cuivre sans en présenter les inconvénients au point de vue hygiénique.

De tous les résultats que je viens de signaler, celui qui par son importance méritait le plus de fixer l'attention était sans contredit l'ébullition de l'eau. L'énorme capacité calorifique du liquide rendait le problème assez difficile à résoudre dans des conditions pratiques : aussi n'ai-je rien négligé pour arriver à une solution dont l'industrie put tirer parti ; et, comme personne à ma connaissance n'avait abordé la question avant moi, peut-être aurai-je le mérite d'être parvenu le premier, sous ce rapport, à des résultats satisfaisants.

Comme je l'ai déjà dit, lorqu'on place au foyer d'un réflecteur, sous des cloches de verre concentriques, un vase rempli d'eau, les vapeurs qui se dégagent du liquide viennent se condenser sur le verre, ce qui est très-nuisible à l'absorption de la chaleur incidente. Pour obvier à cet


Fig. 17.

inconvénient, j'ai percé les cloches de verre à leur sommet et je les ai fait traverser par le col d'une bouteille en



cuivre destinée à servir de chaudière. Les cloches étaient assujéties par des écrous au col de la bouteille : de plus, elles reposaient sur une couronne en ferblanc soudée à la base de celle-ci. Enfin, la chaudière était noircie en dehors, et le fond en était beaucoup plus creux que dans les bouteilles ordinaires afin de diminuer l'épaisseur du liquide à vaporiser. Grâce à ces premières modifications j'ai pu avec un réflecteur en ferblanc d'un quart de mètre carré d'ouverture faire bouillir en une heure quinze minutes un demi-litre d'eau à la température initiale de 15°.

L'emploi d'un réflecteur en plaqué d'argent dont l'ouverture était d'un demi-mètre carré, m'a permis de simplifier encore l'appareil tout en lui donnant de plus



Fig. 18.

grandes dimensions, et de hâter en même temps l'ébullition du liquide.

A cet effet, je me suis servi du générateur solaire dont la figure ci-jointe représente la coupe. La chaudière, toujours en cuivre, affectait la forme d'une bouteille arrondie par le bas : le fond de cette bouteille était fixé par une vis à un disque en bois ; le col traversait la douille d'une cloche en verre, bien transparente mais un peu plus épaisse que les vitres ordinaires. Cette cloche formait à elle seule la paroi vitrée : ses bords entraient librement et sans y être mastiqués dans une rainure du disque, tandis que sa douille était fixée au col de la chaudière par un écrou de cuivre. Enfin, la chaudière était noircie en dehors et elle avait plus d'un litre de capacité.

Ce nouveau générateur amenait en quarante-cinq minutes un litre d'eau à l'ébullition, le liquide étant pris à la température de 15°. De plus, en laissant la chaudière vide, j'ai vu le thermomètre y monter rapidement vers le milieu du jour et finir par accuser au bout de vingt minutes d'insolation la température de 200°. Les soudures se sont alors fondues et l'étain s'est mis à couler, en sorte qu'il a fallu réparer l'appareil.

Cependant, cet appareil n'était encore ni d'une construction assez simple, ni d'une forme assez commode pour devenir usuel. D'ailleurs les dilatations de la chaudière faisaient souvent éclater la paroi vitrée. Il était donc indispensable de recourir à une autre combinaison. C'est alors que j'ai fini par en trouver une des plus simples et qui, en raison de sa simplicité même, aurait dû s'offrir à moi tout d'abord.

J'ai pris un bocal en verre dont la paroi latérale n'était guère plus épaisse qu'une vitre et dans lequel je pouvais facilement introduire un vase cylindrique en cuivre ou en

fer battu dont les bords s'appuyaient sur ceux du bocal ; puis, j'ai mis sur le tout un couvercle en verre, et cette espèce de marmite solaire m'a fourni d'aussi bons résultats que l'appareil précédent ; car, étant placée au foyer du réflecteur en plaqué d'argent, elle faisait bouillir en une heure et demie trois litres d'eau à la température initiale de 15°.

Comme cette nouvelle chaudière était d'une forme assez commode, je m'en suis servi pour différents essais.

Elle m'a permis, par exemple, de confectionner au soleil un excellent pot au feu, formé d'un kilogramme de bœuf et d'un assortiment de légumes. Au bout de quatre heures d'insolation, le tout s'est trouvé parfaitement cuit, malgré le passage de quelques nuages sur le soleil ; et le consommé a été d'autant meilleur que l'échauffement de la marmite s'était produit avec une grande régularité.



Fig. 19.

Voici pour plus de clarté la figure de l'appareil mis en expérience :

a est le bocal en verre; *b* est le vase métallique noirci, dont les bords reposent sur les siens; *c* est le couvercle en verre; enfin, *d* est le réflecteur en plaqué d'argent. Comme je l'ai déjà dit, ce réflecteur est cylindrique : sa hauteur est de cinquante centimètres, sa base est un arc de cercle dont la corde a un mètre. Il est incliné de manière à concentrer les rayons du soleil sur la marmite, et l'on juge, sans difficulté, que celle-ci est bien au foyer par la lueur qui se forme sur la paroi noircie.

Pour transformer cette même marmite en un four, il m'a suffi de couvrir la chaudière d'un disque de fer battu placé sous le couvercle en verre. J'ai pu de cette façon faire cuire en moins de trois heures un kilogramme de pain. Ce pain ne présentait aucune différence avec celui que donnent les fours de boulangerie.

Enfin, en remplaçant les deux couvercles par un chapiteau d'alambic à tête de Maure s'adaptant exactement à la chaudière, je me suis procuré, sans plus de frais, un appareil très-propre à la distillation de l'alcool au soleil. Le chapiteau ayant été mis en communication avec un serpentin plongé dans un courant d'eau froide, tandis que le vase métallique, contenant deux litres de vin, était placé dans le bocal, au foyer du réflecteur, j'ai recueilli l'alcool au bout de quarante minutes d'insolation. Comme l'appareil s'échauffait lentement et d'une manière continue, cet alcool était très-concentré et possédait un arôme des plus agréables.

Voici la disposition que j'ai cru devoir adopter comme étant la plus favorable à l'action de mon réflecteur :

a est la chaudière ou cucurbite contenant le vin; *b* est le chapiteau à tête de Maure; *c*, le serpentin où se con-

dense la vapeur d'alcool; *d*, le robinet par où tombe l'eau destinée à refroidir le serpentin; *e*, l'orifice de sortie



Fig. 20.

pour ce même liquide; *f*, le vase qui reçoit l'alcool condensé; enfin *g*, le réflecteur.

La cuisson de la viande telle que sir John Herschel l'avait obtenue au cap de Bonne-Espérance n'exigeant pas, à beaucoup près, la même somme de chaleur que la vaporisation d'un égal poids d'eau, j'ai soupçonné que mon réflecteur en plaqué d'argent suffirait pour rôtir la viande à l'air libre. C'est, en effet, ce que l'expérience est venue confirmer. En installant devant ce réflecteur une broche garnie d'une pièce de bœuf, de veau ou de mouton, j'obtenais en moins de trois heures un rôti de très-bonne apparence, et dont la cuisson ne laissait rien à désirer. Malheureusement il n'en était pas de même du goût que

ces viandes avaient contracté, malgré leur fraîcheur; les rayons chimiques de la lumière solaire semblaient y avoir déterminé comme un commencement de fermentation putride; les rôtis dans la préparation desquels entrait le beurre contractaient, dans les mêmes circonstances, un goût insupportable. Il est donc nécessaire d'éliminer en pareil cas les rayons chimiques, et l'on y parvient en plaçant devant la rôtissoire une vitre jaune ou rouge.

Je me suis pareillement assuré de la possibilité de faire cuire rapidement au soleil les légumes, les grains, etc. A cet effet je plaçais au foyer du réflecteur un vase clos renfermant de l'eau; puis, quand le liquide entrait en ébullition, je faisais communiquer, à l'aide d'un tuyau, la partie supérieure du vase avec le fond d'un second vase renfermant les légumes, et ceux-ci ne mettaient qu'un temps assez court pour cuire à la vapeur.

Il me restait à vérifier expérimentalement que les effets d'un grand réflecteur sont en raison de son étendue. J'ai fait construire, en conséquence, un miroir cylindro-parabolique de près de 5 mètres de long sur $0^{m},50$ de hauteur. Il avait, par conséquent, une ouverture cinq fois plus grande que celle du miroir d'un demi-mètre carré qui m'avait précédemment servi. Son foyer, dont la longueur était pareillement de 50 centimètres, avait de 8 à 10 centimètres de largeur : ce qui était d'une précision suffisante pour les applications. En installant à ce foyer une marmite solaire de même forme que celle de la figure 20, mais d'une plus grande contenance, j'ai pu faire bouillir en trente-cinq minutes cinq litres d'eau pris à la température initiale de 10°. Ainsi, le grand réflecteur mettait cinq fois moins de temps que le petit pour amener un litre

d'eau à l'ébullition. J'ajouterai que cette expérience a eu lieu vers la fin de février et le commencement de mars 1869, le plus souvent entre neuf et dix heures du matin.

Ce même réflecteur mettait en quelques secondes le feu soit à un tas de copeaux, soit à une planche de bois quelconque. Il m'a servi également à fondre les métaux. Je plaçais à son foyer un grand vase de verre, après y avoir introduit une plaque métallique du poids d'un kilogramme environ. En recouvrant le vase de son couvercle de verre, j'ai vu l'étain fondre en deux minutes, le plomb en cinq, le zinc en six. Mais il ne m'a pas été possible de fondre du laiton. Néanmoins, comme le point de fusion de l'étain est 235°, celui du plomb 335°, et celui du zinc entre 450 et 500 degrés, on voit qu'avec un réflecteur d'une étendue convenable il est facile d'obtenir vite au soleil des températures élevées.

Observons d'ailleurs que, pour obtenir des effets de cette nature, les miroirs sphériques ou en forme de paraboloïde de révolution doivent être préférés aux miroirs cylindriques, puisque le foyer des premiers est un point, tandis que celui des seconds est une droite, et qu'on utilise rarement toute la longueur de cette ligne.

Il est bon de remarquer enfin que si la ligne focale d'un miroir cylindrique conserve sa longueur quel que soit l'angle sous lequel les rayons du soleil rencontrent ses génératrices, elle n'a pas toujours la même intensité. En effet, cette intensité atteint son maximum, toutes choses égales d'ailleurs, quand l'angle dont il s'agit est droit, ou que le faisceau lumineux reçu par le miroir a pour section droite l'ouverture même de ce miroir. Dans tout autre cas

la ligne focale perd de sa force; mais il est rare qu'on s'affranchisse de cet inconvénient et qu'on puisse installer le miroir d'une façon à la fois avantageuse et commode. Aussi les expériences diverses qu'on vient de mentionner ne donnent-elles pas la mesure exacte des résultats qu'il eût été possible d'obtenir avec des réflecteurs bien orientés.

Il y aurait beaucoup d'autres essais à tenter en vue d'utiliser la chaleur solaire dans les contrées où elle abonde : mais nous ne nous sommes pas proposé de les énumérer tous. Notre unique but était d'appeler l'attention sur une source calorifique dont la richesse a été trop longtemps méconnue, et dont ne savent encore profiter ni les pays les plus favorisés du soleil, ni les autres parties du globe où le ciel reste pur. Combien de temps cet état de choses durera-t-il encore, nous ne saurions le prévoir. Mais notre conviction profonde est qu'il disparaîtra quelque jour pour faire place aux conquêtes de l'industrie. Et, cette conviction, ce n'est qu'en voyant les effets produits par le soleil, l'hiver comme l'été, dans des appareils d'un prix médiocre, que nous l'avons acquise. Il était même difficile à cette vue, pourquoi n'en ferait-on pas l'aveu, de se mettre en garde contre l'enthousiasme, et de ne pas oublier un peu le présent pour ne songer qu'aux promesses de l'avenir. Des résultats aussi décisifs pouvaient-ils donc être longtemps méconnus? N'était-ce pas une moisson toute prête à recueillir pour les pays favorisés du soleil et même pour des plaines que la neige recouvre une partie de l'année? Enfin sur quelle autre source de chaleur compter à la cime des montagnes et dans les hautes régions de l'atmosphère où l'air trop

raréfié ne suffit plus à la combustion? Tout présageait donc à ces applications nouvelles un rapide essor..... En sera-t-il réellement ainsi : nous n'osons l'espérer, n'ayant garde d'oublier que toute innovation sérieuse est lente à mûrir et lente à se propager. Laissons donc au temps le soin d'accomplir ce progrès, et passons à l'un des points les plus essentiels de la question qui nous occupe, c'est-à-dire aux applications mécaniques de la chaleur solaire.

CHAPITRE VII

Sommaire. — Histoire des applications mécaniques de la chaleur solaire jusqu'au commencement de ce siècle. — Machine de Héron. — Procédé de Porta. — Pompe solaire de Salomon de Caus; moyens qu'il propose d'accroître l'intensité de la chaleur incidente. — Essais de Drebbel, de Robert Fludd. — Horloge de Martini. — Kircher construit diverses machines solaires; il reconnaît l'avantage d'enfermer l'air confiné dans une enceinte vitrée. — Milliet Dechales propose d'échauffer cette enceinte à l'aide de miroirs plans ou concaves. — Pompe solaire de Bélidor. — De la Cliche propose d'employer l'appareil de Ducarla pour chauffer les machines à vapeur. — Oliver Evans se préoccupe également des applications mécaniques de la chaleur solaire.

Il faut se garder de croire, malgré le silence des traités modernes de physique à cet égard, que l'idée de faire travailler la chaleur solaire soit récente. On va reconnaître au contraire que cette idée est fort ancienne, et qu'en se développant lentement à travers les siècles elle a donné naissance à une suite de curieux appareils dont quelques-uns ne méritaient certes pas l'oubli où ils sont tombés et présentaient même, antérieurement aux découvertes de Papin, un caractère d'utilité pratique beaucoup plus prononcé que les essais contemporains d'application de la vapeur. Au reste, les noms des physiciens qui se sont occupés de la première question figurent presque tous dans l'histoire des origines de la seconde.

Les ouvrages où nous avons puisé la plupart des détails historiques qui vont suivre, sont les *Pneumatiques* de Héron d'Alexandrie, la *Magie Naturelle* de Porta, les *Raisons des Forces mouvantes* de Salomon de Caus, l'*Aimant* de Kircher, la *Mécanique Hydraulico-Pneumatique* de Schott, le *Monde Mathématique* de Dechales, l'*Architecture hydraulique* de Bélidor, etc.... Les matériaux man-

quent d'ailleurs pour combler la lacune de près de seize cents ans qui sépare Héron d'Alexandrie de Porta. Il est certain que, dans cet intervalle, les savants Arabes ont traduit et commenté, non sans y ajouter probablement quelques découvertes, les Traités de Physique et de Mécanique des anciens. On sait, par exemple, qu'Al-Farabi et Alkindi ont parlé de ces matières ; qu'Al-Gazarri a composé sur le même sujet plusieurs ouvrages dont les titres rappellent ceux de quelques écrits d'Archimède, de Ctésibius, de Héron, et qui sont peut-être une compilation des œuvres de ces mécaniciens célèbres ; mais on ignore si ces auteurs se sont occupés des applications mécaniques de la chaleur solaire. Schott se contente de citer les *Pneumatiques* de l'Arabe Vassor et n'en parle qu'avec dédain.

Héron d'Alexandrie

(Environ 100 ans avant Jésus-Christ.)

Héron d'Alexandrie, dans ses *Pneumatiques,* décrit une foule d'ingénieux appareils fondés sur les propriétés des liquides et des gaz, et qui sont, dit-il, ou de son invention ou légués par les anciens. Il est probable qu'il entend désigner par là les prêtres égyptiens d'une époque reculée, auxquels il attribue d'ailleurs la connaissance de l'élasticité de l'air et de l'action de la chaleur sur ce gaz. Nous n'extraierons de ce recueil remarquable à plus d'un titre que la machine suivante qui en est le 47e appareil :

Soit une base fermée A C D B, à travers laquelle passe un entonnoir dont le tuyau soit très-peu distant du fond

(de cette base) ; soit (de plus) un globe E F, d'où un tube descend dans la base jusqu'à une petite distance du fond

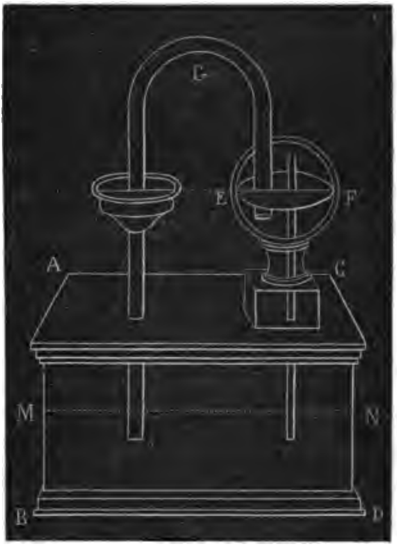


Fig. 21.

de l'appareil. Un tube recourbé G est ajusté de manière à pénétrer dans l'eau du globe. Lors donc que le soleil vient à frapper ce globe, l'air qu'il contient étant échauffé, presse le liquide, celui-ci s'échappe par le siphon et descend dans la base. Mais, quand l'appareil sera à l'ombre, l'air (moins dilaté) cédant de la place dans le globe, le tube reprendra le liquide. Ce phénomène aura lieu autant de fois que le soleil frappera (le globe).

Ce passage, quoique fidèlement traduit et même annoté par Letronne, ne laisse pas que de présenter encore quelques lacunes, probablement dues à des altérations du texte grec. Il est clair, par exemple, que la base de l'appareil doit contenir, outre de l'air, un certain volume d'eau

noyant l'orifice inférieur du tube qui la met en communication avec le globe EF. Il est même bon que le pied de l'entonnoir plonge aussi dans le liquide. Car, ce sont là deux précautions à prendre pour que l'air du globe EF, dilaté par les rayons du soleil, ne trouve pas dans la base une issue facile. L'appareil étant ainsi disposé, on voit sans peine ce qui se passe dès qu'on le soumet à l'insolation. L'air du globe EF acquiert, par l'effet de la chaleur incidente, une tension plus grande et la transmet à l'air confiné dans la base : il en résulte que l'eau monte à des hauteurs égales au-dessus de son niveau dans l'entonnoir et dans le siphon G, en sorte que, la différence de niveau étant moindre du sommet du siphon au plan EF que des bords de l'entonnoir au plan MN, le liquide finit par s'écouler du premier tube dans le second. Il semble même qu'il suffirait de donner au siphon une hauteur à peu près égale à la distance des niveaux MN et EF, et d'affaiblir autant que possible l'influence des frottements pour que le travail restitué à l'appareil par la chute de l'eau dans l'entonnoir pût faire remonter le liquide de la base dans le globe EF, et prolonger ainsi la durée du phénomène.

Quand on retire l'appareil du soleil, l'air confiné dans le globe EF perd une partie de son ressort par le refroidissement, et la pression atmosphérique intervient aussitôt pour réduire ce gaz à son volume normal. Mais, si l'on n'a pas eu soin de boucher hermétiquement l'ouverture libre du siphon G, il est évident que l'eau contenue dans ce tube est refoulée par l'air qui fait irruption à sa suite dans le globe EF, et qu'il est impossible au liquide de la base de remonter dans ce globe. De là une nouvelle lacune à signaler dans le texte.

Il y aurait, d'ailleurs, peu de changements à faire subir à l'appareil pour que le globe EF pût reprendre à l'ombre l'eau qu'il aurait perdue; car il suffirait, pour cela, de deux soupapes s'ouvrant l'une de haut en bas, au pied de l'entonnoir; l'autre de bas en haut, à l'entrée du liquide dans le siphon G. Mais rien ne prouve que l'auteur, bien qu'il connût parfaitement le mécanisme des soupapes, ait eu l'idée de ce perfectionnement. Et même la grande analogie de l'appareil dont il s'agit avec la fontaine de Héron tendrait à établir le contraire. Il n'y a donc pas lieu de regarder l'invention du physicien grec comme le premier essai d'une pompe solaire automotrice.

J.-B. Porta

(1550-1615).

Le Napolitain J. B. Porta, l'un des savants les plus universels de son temps, ne parle des applications mécaniques de la chaleur solaire que dans sa *Magie naturelle*, livre XIX, où nous trouvons le passage suivant :

« Nous pouvons encore faire monter l'eau à l'aide de la chaleur seulement. Soit, au sommet d'une tour, un vaisseau de bois, d'argile, ou, mieux, de cuivre, au milieu duquel s'adapte un tuyau qui descende jusqu'à l'eau d'un réservoir inférieur et dont l'extrémité s'y trouve plongée de façon à ne pouvoir aspirer l'air. En haut, le vaisseau doit être échauffé par le soleil ou à l aide du feu; car l'air contenu dans son intérieur se raréfie et s'échappe en fai-

sant bouillonner l'eau. Bientôt le soleil se retirant, le vaisseau se refroidit; l'air se condense, et comme il ne suffit plus à remplir la capacité du vaisseau, l'eau est aspirée et s'élève au-dessus de son niveau. »

Il est presque inutile d'ajouter que Porta, dans ce passage, s'appuie, pour expliquer l'ascension du liquide dans le tuyau, sur l'hypothèse, alors en crédit, que la nature a horreur du vide. Car ce n'est guère qu'un siècle plus tard que Torricelli assignait aux phénomènes de ce genre leur véritable cause en les regardant comme des effets de la pression atmosphérique. Quant à l'appareil qui vient d'être décrit, on doit y voir une imitation de celui de Héron d'Alexandrie, les écrits du physicien grec ayant incontestablement servi de modèle non-seulement à Porta, mais encore à la plupart de ses successeurs, jusqu'à la fin du XVIIe siècle.

Salomon de Caus

(1576-1626.)

Salomon de Caus, ingénieur français dont Arago a remis les travaux en lumière à propos des origines de la machine à vapeur, donne dans ses *Raisons des forces mouvantes*, publiées, pour la première fois, en 1615, la description de la première machine élévatoire fonctionnant à l'aide du soleil. L'importance de cet appareil, trop peu connu, justifiera la longueur de nos citations, où nous ne changerons, d'ailleurs, que l'orthographe surannée.

Salomon de Caus, après avoir donné, problème XII, la

construction d'une sorte de thermomètre où le travail produit chaque jour par la chaleur solaire peut servir à en mesurer l'intensité, s'exprime ainsi :

« Il a été montré, par le précédent problème, la fabrique et la raison d'un mouvement continuel, de laquelle invention j'ai pris la présente machine à laquelle l'on pourrait attribuer le titre de fontaine continuelle, à raison que l'eau, laquelle de sa nature cherche le plus bas lieu, est élevée ici par le moyen du soleil. Cette dite machine aura un grand effet aux lieux chauds, comme l'Espagne ou l'Italie, d'autant que le soleil se montre en ces endroits presque tous les jours, avec grande chaleur, et spécialement en été. La fabrique en sera telle : Faut avoir quatre vaisseaux de cuivre, bien soudés tout à l'entour, lesquels seront chacun viron un pied carré, et huit ou neuf pouces de haut : lesdits vaisseaux seront marqués A, B, C, D. Et y aura un tuyau marqué E posé sur lesdits vaisseaux, auquel tuyau seront soudées quatre branches, marquées chacune branche par la lettre F ; lesdites branches seront soudées en haut des vaisseaux, passant jusque près du fond de chacun vaisseau. Faut après au milieu du tuyau souder une soupape marquée G, faite et posée en sorte que quand l'eau sortira des vaisseaux elle puisse ouvrir, et, étant sortie, qu'elle se puisse resserrer. Faut aussi avoir un autre tuyau au-dessous desdits vaisseaux, marqué P, auquel il y aura quatre branches, lesquelles seront toutes soudées contre les fonds desdits vaisseaux ; et aussi une soupape marquée H, à laquelle il y aura un tuyau au bout, qui descendra au fond de l'eau, laquelle sera dans une citerne où vaisseau marqué I. Il y aura aussi à l'un des vaisseaux un trou ou évent marqué M :

aussi, faudra exposer la machine en un lieu où le soleil puisse donner dessus, puis verser de l'eau dans les vais-

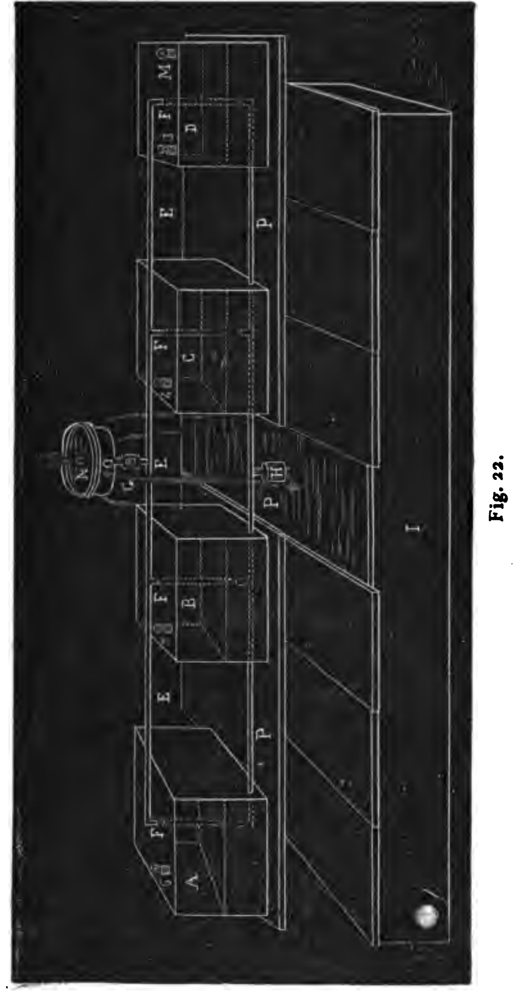


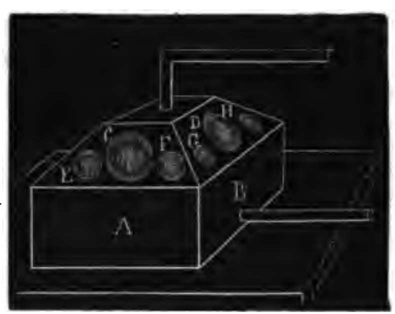
Fig. 22.

seaux par le trou ou évent M, laquelle eau se communiquera à tous les vaisseaux par le moyen du tuyau P; et

faut que lesdits vaisseaux aient viron le tiers de leur contenu d'eau, et l'air qui était en la place de ladite eau sortira par les soupiraux 3, 4, 5, 6. Après, faudra bien boucher tous lesdits soupiraux, en sorte que l'air ne puisse sortir desdits vaisseaux; et alors que le soleil donnera sur ladite machine, il se fera une expansion à cause de la chaleur, ce qui causera l'eau de monter de tous les vaisseaux au tuyau E et sortir par la soupape G et tuyau N, puis tombera dans le bassin O, et de là dans la citerne I. Et comme il sera sorti une quantité d'eau par la violence de la chaleur du soleil, alors la soupape G se refermera, et après que la chaleur du jour sera passée, et que la nuit viendra, les vaisseaux, pour éviter vacuité, attireront l'eau de la citerne par le tuyau et la soupape H, P, pour remplir les vaisseaux comme ils étaient auparavant, tellement que ce mouvement continuera autant comme il y aura de l'eau dans la citerne et que le soleil donnera dessus les vaisseaux ; et faut noter que les deux soupapes G et H seront fort légères, et aussi qu'elles serrent fort juste, sans que l'eau puisse descendre quand elle sera montée.

« Si l'on désirait avoir l'eau 5 ou 6 pieds de haut, la machine précédente ne la pourrait élever si le soleil ne donnait avec grande violence, et, pour augmenter la force dudit soleil, il sera besoin que les vaisseaux de cuivre soient faits à la manière comme la présente figure le montre : et sur les côtés A et B l'on apposera des verres, autrement appelés miroirs ardents, lesquels seront bien ajustés dans le cuivre, en sorte que l'air n'en puisse sortir; lesdits verres seront marqués : les deux grands de chacun vaisseau par les lettres C et D, et les petits, E, F, G, H ; et faut poser le côté du vaisseau B vers le midi, à

celle fin que, le soleil donnant dessus, lesdits verres ar-


Fig. 23.

dents rassemblassent les rayons du soleil dans les vaisseaux, ce qui causera une grande chaleur à l'eau, et par ce moyen sortira en plus grande abondance, et aussi plus haut s'il en est besoin, et quant aux autres côtés des vaisseaux où sont les verres, ils seront posés vers l'occident, pour être aussi le soleil fort chaud après midi.

« Au précédent problème, il a été montré le moyen d'augmenter la force de la fontaine continuelle, et d'au-


Fig. 24.

tant que les verres ardents seront assez difficiles à bien ajuster dans le cuivre pour empêcher l'air de sortir aux

jointures, il m'a semblé bon de démontrer encore une façon, laquelle peut se voir en la présente figure. Le châssis AB sera fait en sorte que l'on puisse enchâsser quantité desdits verres ardents, lesquels seront posés d'une distance de viron trois pieds, en sorte que les pointes des cônes ardents que produisent lesdits verres puissent donner sur les vaisseaux, lesquels étant échauffés par la violente chaleur desdits verres, feront monter l'eau en grande quantité. Et sera bon que ledit châssis soit grand, et d'avoir plusieurs verres enchâssés en icelui, afin que, le soleil en faisant le tour, il y en ait toujours quelques-uns qui puissent donner dessus les vaisseaux. »

Salomon de Caus n'est pas seulement, comme on le voit, l'inventeur d'une pompe solaire, il s'est encore préoccupé d'accroître autant que possible la puissance de son appareil, et l'on peut dire qu'il y a réussi dans la mesure des connaissances de son temps. Nous parlerons plus loin des perfectionnements dont cette machine est susceptible. Ajoutons que Salomon de Caus, en donnant à sa découverte le nom de fontaine continuelle, comprend fort bien que la dénomination de fontaine perpétuelle serait impropre, la machine n'étant pas la réalisation du mouvement perpétuel, puisqu'elle est mue par l'action des rayons solaires. Parmi les savants mêmes que nous aurons encore à citer, il en est qui ne se sont pas toujours élevés à des considérations aussi saines, et qui auraient pu faire leur profit des réflexions suivantes de notre auteur :

« Il y a plusieurs hommes lesquels se sont travaillés à la recherche d'un mouvement qu'ils ont appelé (sans le connaître) perpétuel ou sans fin, chose assez mal consi-

dérée et mal entendue, d'autant que tout ce qui a commencement est sujet à avoir une fin, et faut appliquer ce mot de perpétuel ou sans fin à Dieu seul, lequel comme il n'a eu commencement, ne pourra aussi avoir fin; tellement que c'est folie et orgueil aux hommes de se vouloir faire accroire de faire des œuvres perpétuelles, vu que eux-mêmes sont mortels et sujets à une fin, ainsi seront toutes leurs œuvres. »

Nous devons dire encore que Salomon de Caus indique à la fin de son ouvrage la construction d'un orgue solaire, et qu'il essaie par là d'expliquer la tradition relative à l'antique statue de Memmon, dont les sons harmonieux saluaient chaque matin le retour du soleil.

Drebbel

1572-1634.

Cornelius van Drebbel, né à Alckmaër en Hollande, paraît avoir possédé des connaissances réelles en physique et en chimie; mais c'est principalement par son charlatanisme qu'il sut donner à ses contemporains une haute idée de son mérite. Aussi, lui a-t-on souvent attribué l'invention du thermomètre, du microscope, du télescope, instruments qu'il a tout au plus perfectionnés. Afin de donner une idée de ses prétentions scientifiques, disons que dans sa lettre à son protecteur, Jacques Ier, roi d'Angleterre, il ne craint pas d'affirmer, en s'engageant à le prouver au besoin, qu'il a découvert le mouvement perpétuel, la cause du chaud et du froid, du flux et du reflux,

de la grêle, du tonnerre, etc.... Alsted qui reproduit avec admiration cette lettre pompeuse dans son *Encyclopédie*, ajoute que Drebbel avait également construit un orgue solaire. C'est à ce titre que nous avons dû parler ici du savant hollandais, mais nous ignorons s'il a fabriqué d'autres machines mues par le soleil. Les *Traités de la quintessence et de la nature des éléments*, qu'il a publiés en 1621, ne donnent aucun éclaircissement à ce sujet.

Robert Fludd

1574-1637.

Robert Fludd, médecin anglais d'un savoir étonnant, mais qui joignait à des connaissances exactes toutes les rêveries des sciences occultes, s'est souvent occupé, dans ses écrits, de l'action de la chaleur solaire sur l'atmosphère terrestre et l'air confiné. Cette action lui sert, par exemple, à donner une explication, sinon juste, du moins fort singulière de l'origine des fontaines. Elle lui permet aussi de rendre compte des mouvements de la colonne liquide dans une espèce de thermomètre analogue à celui de Drebbel, mais dont il avoue avoir trouvé le dessin dans un fort ancien manuscrit; et cette assertion n'a rien qui doive étonner, si l'on observe que le thermomètre en question présente une grande analogie avec le réservoir à air de la machine de Héron précédemment décrite.

Les ouvrages de Robert Fludd étant tous postérieurs à 1615, quand même Kircher aurait, comme le dit Schott,

trouvé dans un de ces ouvrages une machine semblable à la fontaine continuelle, il n'y aurait pas lieu de contester à Salomon de Caus la priorité de son invention; mais nous montrerons ailleurs que Schott s'est trompé sur ce point.

Martini

Vers 1640.

« Explication d'une figure et d'une machine réalisant le mouvement perpétuel sous forme d'horloge, » tel est le titre d'un ouvrage publié en 1640 par Antoine Martini,

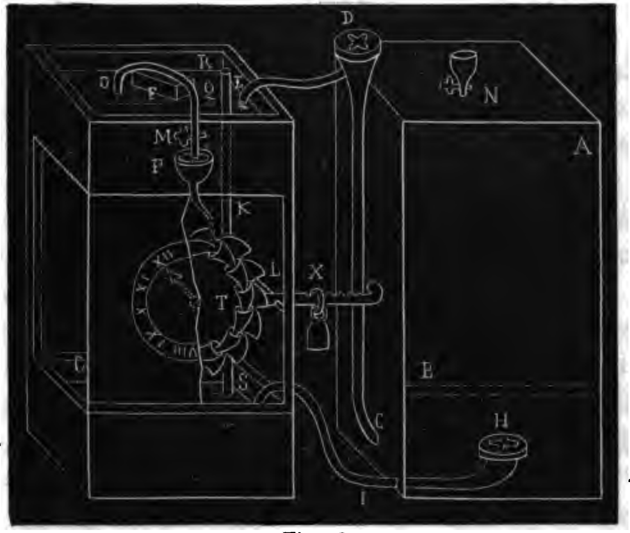


Fig. 25.

professeur de mathématiques au Collége Romain. La machine décrite dans cet opuscule est une application méca-

nique assez curieuse de la chaleur solaire. Schott la décrit en ces termes :

« Soient deux vases AB et EG formés d'une matière susceptible de poli, telle que cuivre, étain, etc....., et dont l'un EG soit partagé en deux compartiments EO et GS par des colonnes ou des cloisons. Si la machine se compose desdits vases AB et EG, c'est afin qu'on puisse placer le vase AB à l'air libre, en dehors d'une fenêtre d'appartement et le vase EG dans l'appartement même, de telle sorte toutefois que les deux vases puissent communiquer entre eux à l'aide de tubes, comme nous le dirons plus loin. Il faut que le vase AB soit parfaitement clos, et qu'il ait son couvercle percé d'une ouverture qui permette d'y verser de l'eau, et sa base traversée par un tube prolongé jusqu'au réservoir SG et muni d'une soupape H s'ouvrant facilement de bas en haut. Ce vase offre en même temps à sa paroi intérieure un autre tube CD, terminé par une soupape D et se prolongeant suivant DE jusqu'au compartiment EO. Le compartiment EO porte à son couvercle une ouverture qui permet à l'air d'y circuler ; il renferme en outre un siphon recourbé OFM, fermé par un robinet M. Ce siphon repose sur un flotteur mobile F et vient aboutir à un entonnoir P. Le compartiment GS est ouvert, du moins dans la partie IS. Sur la paroi extérieure du vase EG se trouve une roue T divisée en douze parties égales, portant chacune, comme on le voit, un des nombres horaires. A ces douze divisions de la roue correspondent douze petites dents disposées circulairement comme le montre la figure. Enfin, autour de la roue et en face des dents se trouvent douze petits seaux ou augets. A l'axe de la roue

est adapté un style ou plutôt une aiguille fixe. Les dents de la roue commandent un levier XL, mais de telle sorte qu'une de ses extrémités puisse être abaissée par ces dents lorsqu'elles descendent. En X est un contre-poids V. Enfin, le tube RQKS, libre à ses deux bouts, descend du compartiment EO jusque près du couvercle R du compartiment SG. Telle est la construction de l'appareil : voici comment il fonctionne.

« Le vase AB doit être rempli d'eau jusqu'au tiers environ par l'ouverture N, qui sera bouchée ensuite avec soin. Puis, toute la machine sera exposée aux variations de l'air, c'est-à-dire au chaud et au froid. Or, par l'effet de la chaleur venant du dehors, l'air du vase AB se raréfie, refoule en vertu de sa tendance à occuper un plus grand espace, l'eau placée au fond du vase et la force à s'élever dans le tube CD. Le liquide rencontre en D une soupape facile à ouvrir, la soulève et se répand de là, par le conduit DE, dans le compartiment EO. Dans ce compartiment se trouve le siphon OFM muni de son robinet M. Si l'on amorce ce siphon soit par aspiration soit de toute autre manière, il se vide dans l'entonnoir P qui se vide à son tour dans les augets de la roue T placés au-dessous de lui. Il faut d'ailleurs régler d'une part l'écoulement de l'eau à travers le siphon au moyen du robinet M, d'autre part le mouvement de rotation de la roue à l'aide du contre-poids V, auquel on cherche sur son rapport une position telle que le bras du levier opposé retienne une à une les dents de la roue, et permette à chaque auget de s'emplir dans l'intervalle d'une heure. L'heure écoulée, l'auget plein d'eau l'emportant sur le contre-poids, le soulève en abaissant le bras du levier opposé : une dent passe ; mais

la suivante est arrêtée par le bras du levier qui se relève grâce au contre-poids V. Tandis que la roue tourne, les nombres horaires tracés sur son contour se succèdent sous l'aiguille et donnent l'heure. Quant à l'eau qui, par suite du mouvement de la roue, s'échappe après chaque heure écoulée d'un auget, elle est reçue par le compartiment SG ouvert en S. De là elle retourne par le tube IH dans le vase AB, aussitôt que le froid vient à y contracter l'air. La chaleur survenant ensuite, le liquide s'élèvera de nouveau par le tube CD dans le compartiment EO, pour descendre de là par le siphon OFM, l'entonnoir P et les augets de la roue T, dans le compartiment SG : et ce mouvement de circulation de l'eau sera perpétuel comme les alternatives de chaleur et de froid. Ajoutons que la vitesse d'écoulement du siphon est constante, car, le flotteur maintenant toujours l'orifice du siphon à la même profondeur dans le liquide, et l'ouverture du robinet M étant réglée une fois pour toutes, la dépense reste la même, soit que l'eau afflue dans le compartiment EO par suite de l'expansion due à la chaleur, soit qu'elle y diminue à cause de la contraction produite par le froid.

« Il faut encore que le compartiment EO puisse contenir une provision d'eau suffisante pour entretenir le mouvement de l'appareil plusieurs jours de suite, afin que, si les variations de l'air étaient peu sensibles, l'eau ne vint pas à manquer au siphon. Si parfois l'expansion de l'air confiné devenait trop considérable et que la provision d'eau élevée par le tube CD ne pût être contenue dans le compartiment EO, le trop-plein s'échapperait par le tube RQKS, faute de quoi le compartiment SG pourrait ne pas suffire à alimenter le vase AB par le moyen du tube IH. »

A. Kircher

1602-1680.

Athanase Kircher, jésuite allemand, dont les vastes connaissances et les aptitudes variées firent l'étonnement de son siècle, a construit divers appareils de physique amusante fonctionnant au moyen de la chaleur solaire; mais ces appareils sont pour la plupart des imitations de ceux qu'avaient imaginés ses devanciers. La fontaine continuelle, par exemple, lui a suggéré, comme il le reconnaît d'ailleurs, l'idée d'une horloge assez singulière dont nous allons tirer la description de son *Traité de l'Aimant*.

Ce curieux ouvrage, où il est question des premiers appareils mus par la vapeur et d'une foule de machines propres à recueillir le travail des agents naturels, ne pouvait manquer de contenir quelques applications mécaniques de la chaleur solaire. Kircher y consacre, en effet, un chapitre à la description de la fontaine continuelle. Le dessin qu'il en donne n'est cependant pas celui qu'on trouve dans le *Traité des Raisons des Forces mouvantes:* c'est un simple croquis où se reconnaissent facilement les diverses parties de l'appareil. De plus, Kircher désigne Salomon de Caus comme l'auteur de la machine qu'il décrit. C'est donc par inadvertance que Schott a vu dans cette description un emprunt fait aux œuvres de Robert Fludd.

Après avoir indiqué la manière de préparer un aimant,

de l'installer dans un globe de verre creux et de maintenir ce globe en équilibre au centre d'un vase sphérique de verre rempli d'eau, Kircher décrit en ces termes le mécanisme de son horloge :

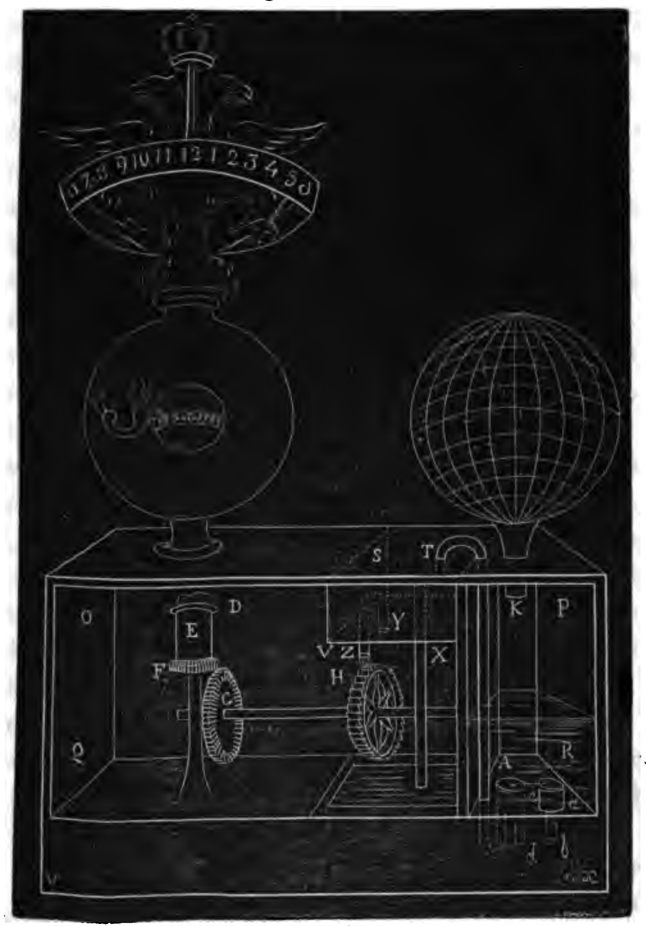


Fig. 26.

« On préparera, dit-il, un globe de verre renfermant

un aimant; puis, une sirène placée en regard pour désigner les heures et autres indications tracées sur son contour; et enfin un cylindre également armé d'un aimant, comme on l'a prescrit ailleurs. Cela fait, soit OPQRSTVX un vase de cuivre, de plomb ou de toute autre matière métallique, ayant des dimensions proportionnées à l'effet qu'on veut obtenir. On partagera ce vase au moyen de la cloison TA en deux compartiments, dont l'un TPAR étant à demi rempli d'eau sera privé de toute communication avec l'air extérieur. On installera sur ledit compartiment une sphère creuse de verre ou de plomb dont le col engagé dans sa paroi supérieure s'y adaptera de façon à ne laisser ni rentrer ni sortir l'air. Il y aura de plus, au fond de ce même compartiment, deux soupapes *ab*, *cd*, s'ouvrant, la première de bas en haut, la seconde de haut en bas : la soupape *cd* sera d'ailleurs à l'entrée d'un tube AT dirigé vers le vase STVX, comme le montre la figure. Ce vase STVX (qui sera le réservoir de l'eau destinée à mesurer le temps) contiendra, en outre, un siphon YZ descendant jusqu'à une roue H munie de seaux ou augets percés chacun d'un petit trou dans le fond pour permettre à l'eau de s'écouler de l'un dans l'autre, avec le temps. L'axe de cette roue commandera le mouvement du cylindre magnétique au moyen de la roue dentée G engrenant avec une autre roue dentée F fixée à la base du cylindre. De plus, la soupape *ab* du compartiment KR sera munie d'un tube plongeant dans la caisse remplie d'eau *vx*. Enfin, un autre tube ouvert par le haut descendra du vase STVX jusqu'au réservoir d'eau inférieur : et la machine sera prête à fonctionner.

« Cette machine sera placée dans un endroit bien exposé au midi, puis solidement assujétie, de façon à ne plus pouvoir être dérangée de sa position. Cela fait, l'air confiné dans la sphère K s'échauffant sous les feux de plus en plus vifs du soleil exigera plus d'espace, et ne trouvant d'autre issue que le col de la sphère K, refoulera l'eau du compartiment KR, à travers la soupape AT, jusque dans le résesvoir supérieur STVX. Ce réservoir sera, d'ailleurs, capable de contenir l'eau nécessaire pour mesurer le temps pendant vingt-quatre heures ou l'espace d'un jour naturel; il pourrait même en contenir trois, quatre, huit fois plus; mais nous laisserons ce détail au choix du constructeur. Le réservoir STVX installé en haut de la machine, étant rempli d'eau, le liquide s'écoulera par le siphon ZY sur la roue H; mais toutes les précautions devront être prises pour que l'écoulement par l'orifice *z* soit uniforme et continu, et pour que l'eau emploie vingt-quatre heures à tomber en totalité sur la roue H, puis à traverser successivement les augets : chacun de ceux-ci mettant une heure environ à s'emplir et à se vider. La provision d'eau du réservoir STVX étant suffisante pour faire tourner en vingt-quatre heures les vingt-quatre augets de la roue H, celle-ci marchera de concert avec la roue G, laquelle ayant le même nombre de dents que la roue du cylindre magnétique fera tourner ce dernier avec la même vitesse. Le cylindre transmettra son mouvement à l'aimant qui le surmonte; l'aimant au globe de verre en équilibre dans l'eau; le globe à un aigle contenant un autre aimant : en sorte que chacun de ces derniers mobiles pourra servir à marquer les heures et autres choses semblables. Cependant la chaleur du jour

ayant expulsé l'eau du compartiment KR, l'air de la sphère K en se contractant pendant la nuit par l'effet du refroidissement, ne trouvera plus de corps à qui céder la place. Il faudra donc, pour que la nature n'ait pas à en souffrir, que l'eau de la caisse vx, attirée à travers la soupape b, vienne combler le vide laissé par l'air et occuper un volume égal à celui du liquide expulsé. Ce nouvel afflux passera de même, au retour du soleil, dans le réservoir STVX, pour entretenir encore le mouvement de l'appareil ; et ainsi pérpétuellement. Ajoutons que le tube X du réservoir STVX est destiné à déverser le trop-plein de ce réservoir dans la caisse vx. Telle est la machine au moyen de laquelle nous avons essayé de réaliser le mouvement perpétuel d'un globe magnétique. »

Kircher, à la suite de ce passage, indique un moyen d'utiliser le vent pour remplir pendant les temps sombres le réservoir STVX ; mais nous ne le suivrons pas sur ce terrain. Faisons seulement observer que, dans la machine précédente, l'écoulement du liquide et le mouvement de la roue à augets sont loin d'être aussi bien réglés que dans l'horloge de Martini. Au surplus, Kircher a construit un autre appareil du même genre marchant avec une certaine régularité et qui doit faire encore partie du musée créé par le savant jésuite au collége romain. En voici la description :

« La coupole CAD est en verre : elle est soudée à un fond en cuivre CBD, de façon que l'air ne puisse passer par la jointure. Le vase est supporté par quatre colonnes fixées sur un autre vase IK, clos de toutes parts, mais qui pourrait être ouvert à sa partie supérieure. Du fond CBD descend, à travers une des colonnes jusqu'à la base du

vase IK, un tube qui se termine en haut par une soupape s'ouvrant du dehors en dedans. A ce même fond CBD



Fig. 27.

s'adapte en B un autre petit tube figuré en L, et muni d'une soupape qui s'ouvre du dedans au dehors. Ce petit tube porte du côté où il adhère au vase un pas de vis au moyen duquel il peut être mis en place ou enlevé suivant le besoin. Enfin, vers le milieu de la machine s'élève un réservoir H communiquant inférieurement par un conduit avec le vase IK. Sur ce réservoir s'ajustent une petite roue à augets FE, un timbre G, ainsi qu'un marteau F, qui, par une disposition ingénieuse, fait sonner le timbre

quand la roue tourne : car le manche de ce marteau est un levier dont l'extrémité commandée par les dents de la roue, comme le montre la figure, s'abaisse quand cette roue tourne, ce qui fait que le marteau se lève, puis retombe par son poids en frappant le timbre. La figure M représente le réservoir H avec son conduit.

« Voici comment fonctionne l'appareil. Afin de remplir (à peu près jusqu'à moitié) le vase CAD, on enlève le tube B, puis on le replace en le vissant de manière à fermer en B toute issue à l'air. Cela fait, si l'air extérieur vient à s'échauffer ou à tiédir, celui qui est confiné dans le vase CAD tend à se dilater et exerce sa pression sur l'eau qui ouvre la soupape B, puis, trouvant par là son issue, coule dans les augets de la roue EF. Les augets, en vertu de cette augmentation de poids, tendent à descendre et font tourner la roue, qui, soulevant, puis laissant retomber le marteau, lui fait produire un son. Pendant ce temps, l'eau qui sort des augets tombe dans le réservoir H, et de là dans le vase IK par le conduit qui s'y rend. Mais aussitôt que l'air extérieur se refroidit par l'effet de la nuit ou de quelque changement de temps, l'air confiné dans le vase CAD se contracte, la soupape N du tube NO s'ouvre, et l'eau du réservoir IK est aspirée par ce même tube. »

Cette description est tirée de la *Mécanique* de Schott. Nous allons faire à cet ouvrage un autre emprunt qui se rattache à notre sujet, puisqu'il s'agit encore d'un appareil capable de fonctionner au soleil comme à la chaleur du feu. Pour dévoiler une supercherie des prêtres de l'ancienne Égypte, Héron décrit deux machines au moyen desquelles les portes d'un temple semblent s'ouvrir ou

se fermer spontanément dès que le feu s'allume ou s'éteint sur l'autel. Nous ne reproduirons que l'une de ces machines, telle que l'a perfectionnée Kircher.

« Sur une base creuse ABCI reposait un autel dans

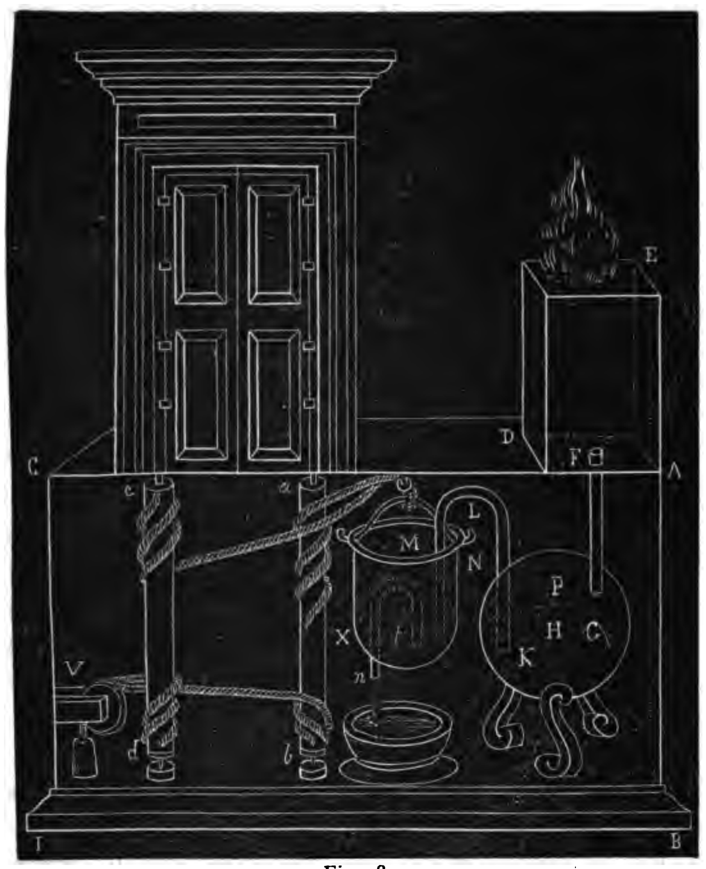


Fig. 28.

l'alignement d'une porte à deux battants susceptibles de tourner comme sur des gonds autour de deux arbres en

fer *ab, cd.* Ces arbres étaient dissimulés dans la cavité ABCI de manière à ne pouvoir être aperçus de ceux pour qui la porte devait s'ouvrir. Dans cette même cavité se trouvait un vase GK d'où sortaient deux tubes, l'un GF pénétrant dans l'autel ED situé immédiatement au-dessus, l'autre KLM, recourbé en forme de siphon, et qui se rendait du fond du vase GK à la marmite XN. L'anse de cette marmite était fixée à deux cordes enroulées, la première sur un des arbres, et la seconde sur l'autre. Ces arbres étaient en outre entourés, à leur partie inférieure, de deux autres cordes passant sur une poulie V et tendues par un contre-poids. Enfin, du fond de la marmite NX sortait un siphon *tn*, et sous cette marmite se trouvait un autre vase. Ainsi disposée, la machine était en état de fonctionner. Au moment du sacrifice, comme on allumait le feu sur l'autel, l'air confiné dans cet autel se dilatait et passait dans le vase GK, préalablement rempli d'eau plus qu'à moitié par l'orifice P, qu'on refermait ensuite avec soin pour empêcher l'air de s'échapper par là. L'air dilaté exerçait donc sa pression sur l'eau du vase IK, et la forçait à couler par le conduit KLM dans la marmite NX. Celle-ci, rendue plus lourde, descendait peu à peu : les cordes tirées par elle faisaient tourner les arbres ainsi que les battants dont ils étaient surmontés, et la porte s'ouvrait. Mais, la marmite une fois remplie d'eau, le liquide s'écoulait par le siphon *tn* dans le vase placé au-dessous. Après quoi la marmite ainsi allégée remontait à son point de départ à mesure que le contre-poids suspendu aux cordes enroulées au pied des arbres redescendait en imprimant à ces arbres des mouvements de sens contraires, et la porte se refermait. De cette façon le sacrifice semblait, au grand

étonnement des spectateurs, s'accomplir grâce à l'intervention de quelque puissance mystérieuse. »

Nous avons déjà dit quelle autre antique tradition fit résoudre à Kircher le problème des miroirs ardents. Mais s'il eut raison cette fois de s'élever contre l'autorité de Képler et de Descartes, il fut moins bien inspiré par le respect des anciennes doctrines quand il essaya d'opposer des fictions, telles que l'horreur de la nature pour le vide, aux belles expériences de Toricelli et de Pascal sur les effets de la pression atmosphérique.

Milliet Dechales

(1621-1678.)

Milliet Dechales, qui publia en 1674, sous le titre de *Monde mathématique*, une encyclopédie fort estimée des sciences de son temps, cite parmi les machines hydrauliques la plupart des appareils que nous venons de mentionner, mais se borne à les décrire sommairement. Dans une de ces descriptions nous trouvons néanmoins le passage suivant qu'il importe de signaler:

« Afin de rendre plus efficace l'action du soleil, on emploiera des matras de verre, tels que C, dont le col engagé dans une ouverture s'y adapte exactement. On placera ces matras en nombre aussi grand que possible sur la paroi du vase qui regarde le soleil levant : car le verre s'échauffe assez vite, ainsi que l'air qui s'y trouve confiné. Pour augmenter encore l'ardeur du soleil, on se servira de miroirs concaves ou même plans, disposés de

manière à en réfléchir les rayons sur les matras de verre :

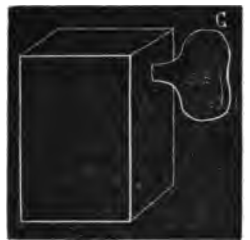


Fig. 29.

car c'est un moyen d'accroître l'intensité de la chaleur incidente. »

Ainsi Dechales comprend déjà toute l'importance d'un miroir ou réflecteur dans la question qui nous occupe. Mais, ce qui ne doit pas moins fixer l'attention, c'est qu'il insiste sur la nécessité de recueillir les rayons du soleil au moyen d'une simple vitre. Bien qu'il se trompe sur la cause de l'influence exercée par le verre en cette circonstance, sachons-lui gré d'avoir essayé de mettre à profit un fait d'observation qui devait être plus tard l'objet de savantes recherches, et dont paraît dépendre l'avenir des applications de la chaleur solaire.

Bélidor

1697-1761.

Bernard Foret de Bélidor, célèbre ingénieur français, dont les ouvrages font encore autorité de nos jours, se contente de reproduire sous une autre forme, dans son

Architecture hydraulique, la fontaine continuelle de Salomon de Caus. Nous allons toutefois transcrire la description qu'il en donne, parce que la théorie de l'appareil s'y trouve exposée avec une grande clarté et conformément aux principes de la physique moderne.

« Je crois qu'on ne sera pas fâché de trouver ici la description d'une pompe naturelle qui peut élever l'eau à une hauteur médiocre par le moyen du chaud et du froid.

« Elle est composée d'un vaisseau sphérique NABC, qu'il

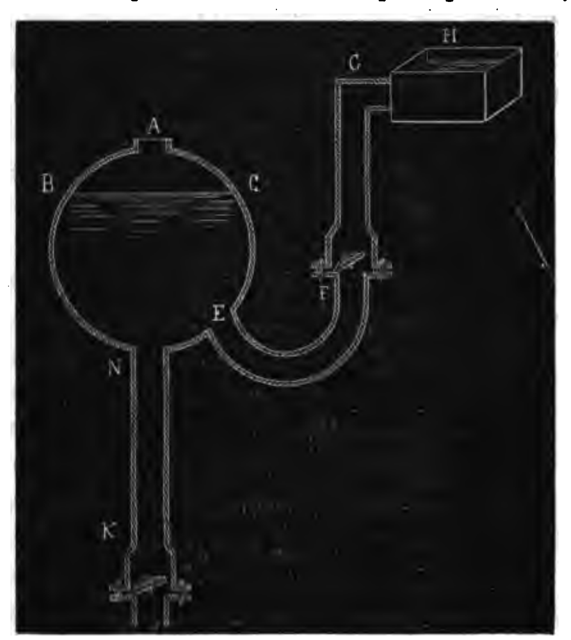


Fig. 30.

convient de faire de cuivre, et lui donner le plus grand diamètre qu'il est possible ; à ce vaisseau sont adaptés

vers le bas deux tuyaux, le premier NK, qui est vertical et qui trempe dans l'eau qu'on veut élever, doit avoir à son extrémité K une soupape.

« Le second tuyau EFG, qui va en montant aboutir par son extrémité G au réservoir H où l'on veut que l'eau aille se rendre, doit avoir aussi une soupape en F disposée de façon qu'étant fermée, l'eau qui est une fois montée dans le tuyau ne puisse plus descendre, et faire attention que l'autre extrémité G de ce tuyau doit être plus élevée que le sommet de la sphère.

« Pour faire agir cette machine, il faut qu'elle soit exposée de façon que le soleil puisse donner dessus pendant toute la journée; on commence par verser de l'eau dans la sphère jusqu'aux deux tiers BNC que l'on introduit par un orifice A, qu'il faut ensuite fermer, afin que l'air qui occupera le reste BAC de la capacité de la sphère ne puisse sortir.

« Pour juger de l'effet de cette pompe, considérez que l'air renfermé dans la partie BAC venant à être échauffé par les rayons du soleil, tendra à se dilater et pressera la surface de l'eau, laquelle ouvrira la soupape qui est en F, poussera celle qui est dans le tuyau FG, la fera passer dans le réservoir H et suivra le même chemin pour y couler elle-même, tant que la chaleur du soleil donnera assez de ressort à l'air renfermé pour presser la surface BC autant qu'il est nécessaire. Quand la chaleur sera passée, la fraîcheur de la nuit succédant, les molécules de l'air intérieur se resserreront, n'auront pas tant de ressort que pendant le jour, et même beaucoup moins que l'air extérieur, parce que celui qui est renfermé, occupant un plus grand volume qu'au commencement que l'air a agi, sera

dilaté dans l'espace vide qu'a laissé l'eau qui est montée le jour. Car, la sphère ayant été remplie aux deux tiers d'eau, s'il en est monté la moitié, par exemple, l'air qui n'occupait qu'un tiers de la sphère, en occupera les deux tiers, et sera dilaté du double de l'air extérieur ; ainsi, ce dernier ayant l'avantage, pressera la surface MI de l'eau de la fontaine ou du puits où trempe le tuyau NK, et la fera monter dans le même tuyau pour passer dans la sphère jusqu'à la hauteur où son poids joint à la force du ressort de l'air intérieur sera en équilibre avec celui du dehors, et l'un et l'autre demeureront dans cet état jusqu'au temps où le soleil échauffera de nouveau l'air intérieur pour faire monter l'eau comme auparavant. Ainsi, la fraîcheur fera monter l'eau, pendant la nuit, de la fontaine dans la sphère, et pendant le jour, la chaleur la fera monter de la sphère dans le réservoir. Au reste, cette pompe ne peut guère réussir comme il faut, que dans les pays où les jours sont fort chauds et les nuits très-froides. »

Nous ne voyons pas qu'après Bélidor on se soit occupé d'essais relatifs à l'action de la chaleur solaire sur l'air confiné, si ce n'est dans ces dernières années. Toutefois les expériences de de Saussure et les promesses de Durcarla ne laissèrent pas que de faire naître l'idée de substituer les rayons du soleil au combustible, même pour le chauffage des machines à vapeur. Nous en trouvons la preuve à la fin du *Traité du feu complet*. L'auteur y cite quelques fragments de mémoires que lui avait adressés, à ce propos, l'ingénieur de la Cliche. Si ces mémoires ne se sont pas retrouvés dans les papiers de Ducarla, mort en 1816, à Villeneuve-du-Tarn, il suffira pour en faire regretter la perte, de reproduire les passages suivants :

« M. de la Cliche, chevalier de Saint-Louis, brigadier des armées du roi, chef de brigade au corps royal du génie, d'après les détails qu'un ami lui fit de mon appareil solaire, m'a fait l'honneur de m'écrire plusieurs lettres accompagnées d'excellents mémoires sur son projet d'appliquer cet appareil à l'entretien des canaux navigables. Mon dessein était de joindre ces pièces à cet essai, pour que le public en jouit au plus vite; mais certaines circonstances nouvelles, et le désir de mieux concilier mes vues avec celles de cet habile officier, me font renvoyer cette publication au prochain mois de novembre; je suppose même, et j'espère que M. de la Cliche persistera dans le dessein qu'il a bien voulu me montrer dans ses lettres.

« En attendant, l'on pourra voir avec plaisir quelques articles des pièces que M. de la Cliche a bien voulu m'adresser.

« Je vois avec une véritable satisfaction que les canaux « de commerce et d'arrosage sont un des objets qui vous « occupent le plus depuis trente ans : comme je suis dans « le même cas, je serais infiniment flatté de corres- « pondre et de me lier avec vous sur cet objet inté- « ressant.

« Je sens, monsieur, toute l'importance des vues géné- « rales que vous avez publiées sur la charpente extérieure « du globe, et des moyens que vous avez communiqués à « plusieurs personnes de Paris et de Genève pour l'exca- « vation des canaux et des rivières. Je me suis également « occupé de ce dernier objet, que j'ai amplement discuté « dans les mémoires que j'ai adressés au gouvernement. « Lors du voyage que je me propose de faire à Paris

« avant l'hiver, je serai très-empressé de vous faire con-
« naître mes moyens à cet égard : c'est ce qu'en dit
« M. de la Lande, dans ses *Canaux de navigation*, à
« l'occasion de celle de la Seine, chap. II, n° 394, qui
« m'en a fait naître l'idée : j'en ai en outre quelques
« autres sur le transport des terres, que je serais enchanté
« de pouvoir mettre en pratique dans le projet dont je
« m'occupe.

« J'ai l'honneur de vous en adresser ci-joint un précis :
« vous y verrez, monsieur, tout le cas que je fais de votre
« intéressant appareil solaire, d'après ce que M. Donadei
« m'en a dit, et ce que j'en ai appris dans les journaux.
« Vous verrez l'application que j'en voudrais faire aux
« moulins établis sur des rivières susceptibles par elles-
« mêmes de navigation..... C'est une circonstance très-
« intéressante dans votre appareil solaire, de ce que les
« verres n'éprouveraient aucun effort de la vapeur qu'il
« faut, à présent, tâcher de contenir malgré les mouve-
« ments à donner au récipient.

« Belfort, le 2 juillet 1784. »

« Je crois, monsieur, que l'annonce que vous voulez
« bien faire de mes vues, à la fin de votre mémoire sur le
« *Feu complet*, serait un peu vague, et induirait même
« en erreur, puisque vous y supposez que l'application
« que je voudrais faire de votre appareil solaire n'a pour
« objet que l'entretien des canaux navigables. Si cela est
« possible, j'aimerais mieux (par les raisons que mes
« mémoires ci-joints vous feront aisément sentir) que
« vous eussiez la bonté d'annoncer que mon projet est

« d'appliquer cet appareil aux moulins et usines établis « sur des rivières sujettes à de grandes crues, afin de « pouvoir en supprimer les digues ou barrages, qui, en les « traversant, y occasionnent des dépôts considérables, « exposent, en conséquence, les villes et les héritages « riverains aux funestes effets de leurs débordements, et « en interceptent la vavigation.....

« Description d'un moulin mu par une machine à feu « simplifiée. Première partie. Détails pour économiser le « combustible, par le moyen de la chaleur concentrée du « soleil suivant les procédés de M. Ducarla.

« La machine à feu dont il s'agit ici doit mettre en « mouvement deux pompes aspirantes et refoulantes « accouplées, de trente pouces de diamètre chacune, pour « élever sans interruption un cylindre d'eau de pareille « grosseur à dix-huit pieds de hauteur..... avec une « vitesse de près de vingt pouces par seconde; et ce, au « moyen d'une dépense en vapeur d'environ quatre cent « soixante-onze pieds par uinute. — Mémoire joint à la « lettre du 2 juillet. »

Enfin au commencement même de ce siècle, un des plus grands ingénieurs des Etats-Unis, Oliver Evans, se préoccupait également des applications mécaniques de la chaleur solaire. Nous en trouvons la preuve dans le *Bulletin de la Société d'encouragement pour 1821*.

On y lit, en effet, ce passage d'un rapport sur les travaux de M. de Valcourt qui avait longtemps vécu dans l'intimité d'Oliver Evans:

« Il rapporte que le célèbre mécanicien lui dit un jour que, dans les colonies où le soleil est toujours très-ardent, il ne serait pas impossible de chauffer les chaudières des

machines à vapeur avec des miroirs en grand nombre, montés sur un même châssis, et dirigés sur un même point ; idée singulière qui rappelle en même temps les miroirs d'Archimède et de Buffon, et plusieurs appareils qu'on trouve décrits dans les anciens recueils de machines, et qui avaient pour objet d'élever l'eau par l'intermède de l'air échauffé par les rayons du soleil. »

CHAPITRE VIII

SOMMAIRE. — Examen de la fontaine continuelle de Salomon de Caus; défauts qu'elle présente; moyens d'y remédier. — Pompe solaire de M. Deliancourt. — Nouvelle pompe solaire. — Machine de Cagniard-Latour; on peut la transformer en un moteur solaire. — Emploi direct des rayons du soleil pour le chauffage des machines à vapeur; expériences tentées à ce sujet. — De la meilleure disposition à donner aux générateurs solaires. — Machines à air chaud; celle de M. Laubereau paraît devoir fonctionner au soleil dans d'excellentes conditions. — Machine à ammoniaque de M. Frot; avenir probable de cette invention. — Essais récents d'Ericsson.

Si les détails historiques dans lesquels nous venons d'entrer prouvent que les physiciens se sont préoccupés longtemps des moyens de faire travailler la chaleur solaire, il est juste de reconnaître que la plupart de leurs découvertes en ce genre consistaient en machines plus ingénieuses que susceptibles d'être utilisées. Toutefois la fontaine continuelle fait exception sous ce rapport. Car, ce n'est pas seulement une machine curieuse, destinée à l'embellissement des jardins ; c'est une pompe solaire qui, moyennant quelques améliorations peut servir à résoudre économiquement le problème de l'élévation des eaux dans les contrées méridionales. A ce titre, elle mérite un examen sérieux, et l'on s'étonne d'autant plus de la voir à peu près oubliée de nos jours, que c'était une invention remarquable pour le temps où elle a pris naissance. Il suffit, en effet, de la comparer à l'essai de Porta ou même à l'ingénieuse machine de Héron, pour qu'elle nous apparaisse sous son véritable jour, c'est-à-dire comme la réalisation d'un progrès important. Quant aux appareils de Fludd, de Martini, de Kircher et de Bélidor, ils n'en sont,

à part quelques détails intéressants, que des copies ou des applications puériles, plus propres à discréditer l'idée de Salomon de Caus qu'à en montrer le côté pratique. La fontaine continuelle l'emportait également sur cette autre machine du *Traité des raisons des forces mouvantes* que l'auteur donne comme un moyen d'élever l'eau à l'aide du feu. Mais, celle-ci devait servir de point de départ à une série de découvertes aussi brillantes que rapides, puisqu'elle était comme le germe des applications de la vapeur, tandis que l'autre allait être abandonnée peu à peu. Quoi de plus rationnel cependant que le projet de faire monter les eaux à l'aide de l'agent même qui les élève dans la nature : et quoi de plus simple que l'appareil construit par Salomon de Caus pour atteindre ce but à peu de frais? Il faut donc le reconnaître, l'arrêt qui a fait reléguer dans l'oubli la fontaine continuelle aurait eu pour effet, s'il était irrévocable, de ruiner à leur naissance des prévisions fondées et des chances de succès aussi légitimes que séduisantes. Mais, on ne saurait trop le répéter, il est permis, grâce aux progrès actuels de la science, d'en appeler d'un pareil jugement et d'ouvrir à l'heureuse idée de Salomon de Caus le domaine de l'industrie.

Si, comme chacun sait, le modeste ingénieur français, dont les ouvrages et le nom même furent tirés de l'oubli à propos des origines de la machine à vapeur, n'a que des droits fort contestables à cette grande découverte, il en est autrement dans la question qui nous occupe. N'eût-il fait que s'inspirer en la complétant de la machine de Héron, Salomon de Caus n'en aurait pas moins tellement contribué pour sa part à la création de la pompe solaire auto-

motrice qu'on peut le regarder comme le véritable inventeur de cet appareil. Ses titres de priorité sont d'ailleurs consignés dans ce passage où, en parlant de la chaleur du soleil, il dit : « Et quant au feu élémentaire, il y a aucunes machines en ce livre, lesquelles ont mouvement par le moyen d'icelui, comme l'élévation des eaux dormantes et autres machines suivantes icelles non démontrés par ci-devant. » A la vérité, ce document pourrait être plus explicite ; mais, nous le croyons suffisant, puisqu'en pareille matière, Kircher n'invoque pas d'autre autorité que celle de Salomon de Caus.

Pour peu qu'on cherche actuellement les causes qui ont pu faire abandonner la fontaine continuelle, on les trouve d'une part dans le faible rendement de l'appareil, d'autre part dans l'opinion généralement reçue, que la chaleur solaire n'est pas une source de travail naturel assez riche pour être immédiatement exploitée par l'industrie. Mais, en admettant que cette opinion soit fondée et qu'on ait employé pour recueillir les rayons du soleil, les récepteurs les plus convenables, il resterait à établir que la fontaine continuelle, échappant au sort commun des inventions à leur début, est sortie parfaite des mains de son inventeur. Or, il suffit d'un examen rapide, en se plaçant au point de vue des données actuelles de la physique, pour arriver à une conclusion tout opposée. Comme il n'est peut-être pas inutile d'entrer dans quelques détails à cet égard, nous allons énumérer les défauts de l'appareil et les moyens d'y remédier, indépendamment des améliorations à apporter aux récepteurs solaires. Au surplus, nous y sommes naturellement amené par notre sujet, puisque les essais dont il nous reste à parler ne sont que

des perfectionnements de l'œuvre de Salomon de Caus.

Les vaisseaux de la fontaine continuelle sont en cuivre, métal bon conducteur et capable, par conséquent, de transmettre vite à l'air confiné la chaleur qu'il recueille. Si cet air était seul en contact avec le métal il ne céderait, comme on l'a dit ailleurs, qu'un peu de sa chaleur à l'eau et le reste de cette chaleur se convertirait immédiatement en travail. Mais c'est au contraire le liquide qui, dans cette circonstance, absorbe la majeure partie des rayons solaires, et nuit de la sorte au rendement de l'appareil. On augmenterait donc ce rendement d'une manière notable en formant le corps des vaisseaux de quelque matière peu conductrice, et la plate-forme supérieure, qui est plus directement exposée au soleil, d'une autre matière capable de transmettre aussi vite que possible la chaleur incidente à l'air confiné. Or, il est facile de satisfaire à cette double condition, même en n'employant que des métaux usuels. En effet, les pouvoirs conducteurs de ces métaux, quand on représente celui de l'argent par 1,000, sont, d'après MM. Wiedemann et Franz :

Cuivre	736.
Laiton	236.
Zinc	193.
Étain	145.
Fer	119.
Plomb	85.

On pourrait donc construire les vaisseaux dont il s'agit en ajoutant, par exemple, un couvercle de cuivre à un corps de pompe en tôle galvanisée. De plus, il serait bon

de noircir la plate-forme en cuivre, afin d'en accroître le pouvoir absorbant.

L'insuffisance de la chaleur, transmise à l'air confiné dans les vaisseaux, est une seconde cause du peu de rendement de la fontaine continuelle. On a vu Salomon de Caus essayer d'améliorer son invention sous ce rapport, mais les moyens qu'il propose à cet effet seraient plus dispendieux qu'utiles. L'un présenterait, comme il le reconnaît lui-même, de grandes difficultés d'exécution ; et l'autre, à moins de dépenses considérables, ne rendrait pas les services qu'il en attend. On sait, en effet, qu'une lentille ne transmet jamais toute la chaleur qu'elle reçoit directement ; en sorte que si on l'interpose entre le soleil et une surface donnée pour y accroître l'intensité de la chaleur incidente, elle doit ou excéder cette surface en étendue, ou agir concurremment avec d'autres lentilles qui l'aident à remplir cette dernière condition. D'où il suit que, pour produire l'effet désiré, le châssis proposé par Salomon de Caus serait plus coûteux à construire qu'on ne le croirait au premier abord. Il est d'ailleurs un moyen fort simple d'accroître l'intensité de la chaleur incidente sur la plate-forme des vaisseaux : c'est, tout en la laissant à l'insolation directe, d'y projeter à l'aide d'un réflecteur de forme convenable tel surcroît de chaleur qu'on voudra. Encore cette disposition pourrait-elle entraîner dans d'assez grandes dépenses, s'il n'était possible de restreindre les dimensions du réflecteur en préservant du refroidissement la surface de chauffe au moyen d'une simple vitre. Il est donc permis de conclure de tout ce qui précède qu'une des meilleures dispositions à adopter pour la fontaine continuelle consisterait à en former les vaisseaux de

deux parties, l'une contenant l'eau et lui transmettant fort peu de chaleur ; l'autre munie d'un châssis vitré et d'un réflecteur concourant à échauffer très-vite l'air confiné.

De toutes les imperfections de la fontaine continuelle, la plus grande est la trop longue durée des périodes de son mouvement, puisque cette durée est d'un jour et une nuit. Il est vrai que pendant une même journée le soleil, en brillant et se cachant tour à tour parmi les nuages, peut occasionner à la machine de fréquentes alternations de chaleur et de froid, et lui imprimer par suite à diverses reprises l'équivalent du coup de piston dans les pompes ordinaires. Mais de pareilles éventualités ne sauraient entrer en ligne de compte, et la fontaine continuelle, à moins d'offrir de vastes dimensions, rendrait en définitive peu de services, s'il n'était possible de la transformer en un appareil automoteur assez actif. Deux moyens d'atteindre ce but s'offrent tout d'abord à l'examen. La machine doit-elle expulser l'air chaud qui vient d'agir, ou faut-il qu'elle refroidisse brusquement l'air confiné dès qu'il atteint sa limite d'expansion ? Ainsi que nous l'avons dit ailleurs, nous avons cru reconnaître qu'il est beaucoup plus facile de réaliser le second effet que le premier. Aussi, les essais, comme on va le voir, ont-ils moins porté sur celui-ci que sur l'autre.

A en juger par la lettre suivante que nous empruntons à la *Science pour Tous*, du 16 février 1865, M. Deliancourt, commandant de place à Saïda (Algérie), paraît avoir tenté, le premier, la résolution de ce problème :

« Monsieur le directeur,

« J'ai l'honneur de vous faire connaître qu'en 1860,

j'ai inventé une pompe solaire fonctionnant aussi par l'effet des rayons du soleil sur l'air confiné. J'ai remis ce travail, le 12 mai 1860, à S. Exc. M. le maréchal Vaillant, et j'ai sa réponse datée du 13 à Milan.

« Maintenant voici l'explication de ma pompe solaire, dont le dessin est ci-contre.

« L'appareil est hermétiquement fermé et ne communique à l'extérieur que par les tubes C et D. Ces tubes sont garnis de soupapes qui agissent en sens inverse ; c'est-à-dire que, quand la pression est intérieure, la soupape F s'ouvre et la soupape G se ferme, et que quand la pression est extérieure, c'est la soupape G qui s'ouvre et la soupape F qui se ferme.

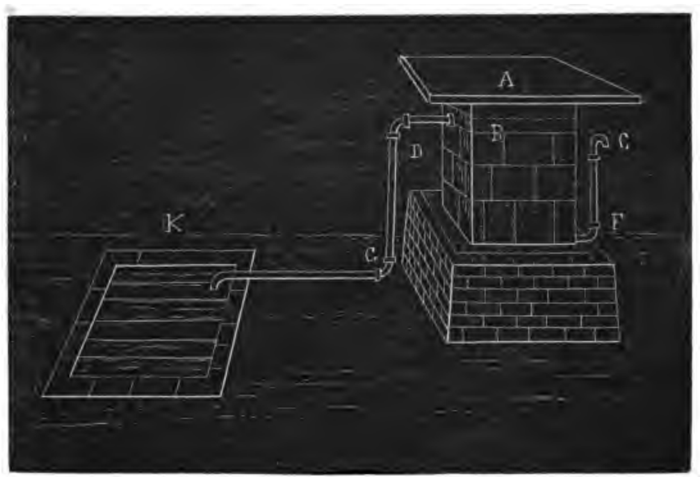


Fig. 31.

« L'appareil contient de l'eau jusqu'à la ligne B ; le reste est de l'air atmosphérique.

« La surface A est en métal mince et noirci ; cette plaque de métal est soutenue par des colonnes soudées intérieu-

rement pour pouvoir résister à la pression atmosphérique lorsque le vide se fait, et au soulèvement lorsque l'air intérieur est dilaté par l'action de la chaleur.

« La surface A étant échauffée par les rayons solaires, l'air se dilate et presse sur l'eau qui sort par le tube C.

« La surface A étant mise ensuite à l'abri du soleil par un moyen quelconque, l'air qui s'était dilaté se condense, l'eau sortie par le tube C forme un vide qui est aussitôt rempli par l'eau du réservoir K.

« L'appareil peut marcher seul de plusieurs manières; en voici une :

« Mettre l'appareil dans le plateau d'une balance, dont l'autre plateau contient un poids équivalent.

« Quand une certaine quantité d'eau est sortie de l'appareil, le plateau qui le contient devenant plus léger, se soulève et fait jouer un ressort qui fait placer un écrou léger en étoffe au-dessus de la surface A.

« Le refroidissement s'opère comme il est expliqué plus haut; l'eau écoulée par le tube C est remplacée par celle venant du réservoir; le plateau de l'appareil reprend son équilibre, l'écran se replie et la surface A est de nouveau soumise à l'action du soleil; et ainsi de suite tant qu'il y a du soleil.

« L'espace qui contient l'air atmosphérique peut être modifié; il peut être éloigné, être placé plus bas ou plus haut, pourvu qu'il communique à l'eau par un tube arrivant au-dessous de l'eau.

« Il en résulte qu'on peut combiner et multiplier les moyens de faire marcher l'appareil seul, de même que l'endroit d'où sort l'eau peut être placé à l'ombre, pourvu que la boîte à air soit exposée au soleil.

« Maintenant vient le côté pratique. Il faut, pour que cet appareil puisse rendre des services à l'agriculture, surtout en Algérie, que quelqu'un trouve le moyen de le produire à bon marché.

« C'est à l'industrie et au commerce à résoudre cette question.

« En vous écrivant cette lettre, Monsieur le Directeur, mon but est moins pour réclamer la priorité de mon idée que pour la faire connaître et exciter l'industrie à s'en emparer. »

La pompe solaire de M. Deliancourt n'est pas, comme on voit, un appareil entièrement nouveau. C'est la fontaine continuelle de Salomon de Caus raccourcissant elle-même les périodes de son mouvement et par suite notablement améliorée. La surface de chauffe ou d'insolation de la machine est relativement fort grande : de plus elle est noircie ; ce sont encore deux progrès à noter. Mais, la disposition qui consiste à former cette surface d'un métal mince, sauf à la consolider par des supports intérieurs nous semble moins heureuse. Sans nul doute le but que s'est proposé d'atteindre par là M. Deliancourt est de transmettre rapidement la chaleur incidente à l'air confiné, et tel serait aussi l'effet de la disposition qu'il adopte. Malheureusement cette disposition ne saurait guère se concilier avec la résistance que doivent offrir les parois de la pompe. Admettons, en effet, que la longueur du tuyau d'élévation soit d'un mètre : ce qui répond à une différence d'un dixième d'atmosphère entre la pression de l'air confiné et celle de l'air extérieur ; il en résulte que la surface de chauffe doit être capable de résister à un effort intérieur de mille kilogrammes par

mètre carré. En voulant la former d'un métal mince, on s'imposerait donc une condition difficile à remplir. Mais, d'après ce qu'on a vu plus haut, cette condition n'est pas indispensable, et, pour atteindre le but en question, il suffit que la surface de chauffe soit une feuille de cuivre suffisamment épaisse.

Il est un point de la lettre de M. Deliancourt où l'on eût désiré plus de détails. Je veux parler de la partie vraiment neuve de son projet, c'est-à-dire des moyens de refroidir l'air confiné lorsqu'il atteint sa limite d'expansion. Parmi ceux qui seraient propres à remplir cet objet, M. Deliancourt n'en fait connaître qu'un seul, fort simple, il est vrai, mais qui semble défectueux parce qu'on peut douter de l'efficacité d'un écran d'étoffe pour amener dans l'appareil un refroidissement convenable. D'après mes expériences ce refroidissement doit être aussi rapide qu'énergique, et je n'ai rien trouvé de mieux pour l'obtenir que de faire séjourner un instant sur la surface de chauffe l'eau qui sort du tuyau d'élévation. J'ignorais d'ailleurs les essais de M. Deliancourt aussi bien que les tentatives antérieures dont j'ai tâché de retracer l'histoire, quand, vers la fin de 1860, l'idée me vint d'utiliser directement le travail de la chaleur solaire. Un de mes premiers projets fut celui d'une pompe fonctionnant d'elle-même au soleil. Parmi les dispositions qui m'ont paru le moins défectueuses, en voici une dont je ne représente que la coupe :

Le corps de pompe est formé d'un entonnoir ou d'un tronc de cône renversé ABCD, terminé par un long cylindre de même diamètre que son ouverture inférieure CD, laquelle est beaucoup plus étroite que l'ouverture supérieure AB. Ce corps de pompe est contruit en fonte ou

en tôle très-forte, à l'exception du fond supérieur *ab*, qui est en cuivre. La plate-forme *ab* est la surface de chauffe ou d'insolation de la machine : elle est noircie pour mieux absorber la chaleur ; et, de plus, elle est soudée aux pa-

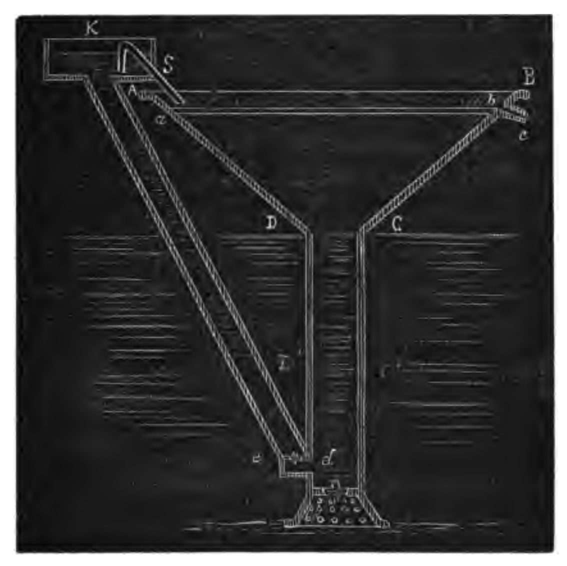


Fig. 32.

rois du corps de pompe, un peu au-dessus du bord AB, de manière à former une sorte de cuvette où l'eau élevée par l'appareil puisse séjourner quelque temps avant de se rendre à sa destination par l'ajutage *c*. Le fond EF du corps de pompe est percé de deux ouvertures fermées par des soupapes *d* et *e*, s'ouvrant de bas en haut l'une et l'autre. La soupape *e* est à l'entrée d'un tube se rendant au réservoir K dont le fond est situé un peu au-dessus du bord AB du corps de pompe. Enfin, un siphon S s'amorce de luimême quand le réservoir K est plein d'eau, et déverse le

liquide sur la plate-forme *ab*. Telle est la machine dans son ensemble ; voici comment elle fonctionne :

L'appareil étant plongé dans l'eau jusqu'au niveau CD, le liquide remplit la partie cylindrique du corps de pompe, en admettant que l'air confiné dans le tronc de cône soit à la même température et à la même pression que l'air extérieur. Mais aussitôt que le soleil darde ses rayons sur la plate-forme *ab*, celle-ci s'échauffe assez vite, et, comme le cuivre est bon conducteur, la chaleur se transmet instantanément à l'air confiné qui, pressant avec énergie sur l'eau, la force à soulever la soupape *e* et à passer dans le réservoir K. Si l'on a eu soin de donner à ce réservoir des dimensions telles que le débit puisse le remplir entièrement, l'air confiné n'atteint pas plus tôt sa limite d'expansion C', que le siphon S s'amorce de lui-même et couvre d'eau la plate-forme *ab*. Le liquide séjourne, d'ailleurs, sur cette plate-forme le temps de la refroidir, pourvu que l'orifice de l'ajutage *c* soit beaucoup moindre que celui du siphon. L'air confiné, perdant ainsi de sa chaleur, tend à reprendre son volume primitif, et la pression atmosphérique, pour le ramener à son état normal, force l'eau du puisard à soulever la soupape *d* de manière que le liquide remonte dans le corps de pompe jusqu'au niveau CD. Pendant ce temps le débit s'écoule par l'ajutage *c*, en laissant la plate-forme à sec ; puis les mêmes alternatives recommencent tant que dure l'insolation.

On voit, sans peine, que si la partie cylindrique du corps de pompe est d'un aussi petit diamètre, c'est afin de rendre la dépression CC' du liquide suffisante pour permettre à l'eau du puisard de soulever la soupape *d*. Peut-

être sera-t-on même obligé d'alléger cette soupape autant que possible au moyen d'un flotteur. Enfin, pour que l'eau du réservoir K reste froide, il sera bon de mettre ce réservoir en terre, et le corps de pompe lui-même pourra n'offrir à l'air libre que la plate-forme *ab*.

La pompe que l'on vient de décrire n'est propre à élever l'eau qu'à de faibles hauteurs, telles que 1 mètre ou 1^{m}50; mais peut-être serait-elle déjà susceptible de rendre quelques services à l'agriculture. Il serait, d'ailleurs, facile d'en accroître la puissance en recouvrant la plate-forme *ab* d'une lame de verre, et en l'échauffant à l'aide d'un réflecteur. On pourrait aussi placer un piston dans la partie cylindrique du corps de pompe, et substituer à l'air confiné quelque liquide très-volatil qui se vaporiserait sous l'action des rayons solaires pour se condenser ensuite quand l'eau recouvrirait la plate-forme. Enfin, si l'on voulait se servir d'appareils de ce genre pour faire monter l'eau à une grande hauteur, il suffirait de les disposer en gradins sur les flancs d'un coteau voisin du puisard et convenablement exposé au soleil. L'eau élevée par le premier de ces appareils serait puisée par le second, et ainsi de suite. Mais c'est assez insister sur une question dont on appréciera l'utilité, et que mon unique but était de signaler à l'attention publique en suivant l'exemple de M. Delianoourt.

Il est un autre moyen de faire travailler l'air porté à une température modérée; il a été indiqué par Cagniard-Latour, et semble convenir aux applications de la chaleur solaire. Voici l'extrait du Rapport fait à l'Institut par de Prony, Charles, Montgolfier et Carnot, sur le moteur imaginé par ce grand physicien :

« On sait que tout corps plongé dans un fluide perd une partie de son poids égale à celle du fluide qu'il déplace ; c'est sur ce principe qu'est établie la nouvelle machine proposée par M. Cagniard.

« Le moteur, dans cette machine, n'est point la vapeur de l'eau bouillante, comme dans les machines à feu ordinaires, mais un volume d'air qui, porté froid au fond d'une cuve remplie d'eau chaude, s'y dilate, et qui, par l'effet qu'il fait alors pour se reporter à sa surface, agit à la manière des poids, mais de bas en haut, conformément au principe énoncé ci-dessus.

« Ce moteur une fois trouvé, on peut l'employer de bien des manières différentes ; voici celle de M. Cagniard.

« Sa machine est, à proprement parler, composée de deux autres, qui ont des fonctions tout à fait distinctes. La première est destinée à amener au fond de la cuve d'eau chaude, le volume d'air froid dont il a besoin. La seconde a pour objet d'appliquer à l'effet qu'on veut produire, l'effort que cet air, une fois dilaté par la chaleur, fait pour se reporter à la surface supérieure du fluide.

« Pour remplir le premier objet, qui est d'amener l'air au fond de la cuve, M. Cagniard emploie une vis d'Archimède. Si une pareille vis fait monter un fluide en la faisant tourner dans tel ou tel sens, il est évident qu'elle devra le faire descendre si on la tourne en sens contraire ; si donc elle est plongée dans l'eau de manière que la seule partie supérieure de son filet spiral reste dans l'air, elle devra, lorsqu'on la tournera en sens contraire, faire descendre au fond de cette masse d'eau l'air qu'elle saisit à sa partie supérieure à chaque tour de sa rotation. C'est ce qui a lieu, en effet, dans la machine de M. Cagniard. L'air

dont il a besoin est d'abord porté au fond du réservoir d'eau froide, où est plongée la vis ; de là il est conduit par un tuyau au fond de la cuve d'eau chaude. La chaleur de cette eau le dilate aussitôt, et crée ainsi la nouvelle force qui doit servir de moteur : ainsi se trouve rempli le premier objet du mécanisme proposé.

« Le second objet est d'appliquer ce nouveau moteur à l'effet qu'on veut produire ; pour cela, l'auteur emploie une roue à augets, entièrement plongée dans la cuve d'eau chaude. L'air, dilaté et rassemblé au fond de cette cuve, trouve une issue qui lui est ménagée pour le diriger sous ceux des augets dont l'ouverture est tournée en bas. Alors sa force ascensionnelle chasse l'eau de ces augets, et le côté de la roue où ils se trouvent, devenant plus léger que l'autre côté où les augets restent pleins, la roue tourne continuellement comme les roues à pots ordinaires.

« Cette roue, une fois en mouvement, peut transmettre à d'autres mobiles quelconques, soit par engrenages, soit par d'autres moyens, l'action du moteur. Dans la machine exécutée par M. Cagniard, l'effet produit consiste à élever, au moyen d'une corde attachée à l'axe de la roue, un poids de quinze livres, avec la vitesse uniforme verticale d'un pouce par seconde, tandis que la force mouvante appliquée à la vis est seulement de trois livres, avec la même vitesse. L'effet de la chaleur est donc de quintupler l'effet naturel de la force mouvante.

« On conçoit que l'effet de la force mouvante étant quintuplé, on peut prélever sur cet effet même de quoi suppléer à cette force mouvante, et qu'il restera encore une force disponible quadruple de cette même force mouvante. C'est ce qui a lieu, en effet, dans la machine de

M. Cagniard. Il établit par un joint brisé la communication entre l'axe de la roue et celui de la vis. Celle-ci tourne alors comme si elle était mue par un agent extérieur, et consomme par ce mouvement un cinquième de l'action du moteur. Le reste sert à élever un poids de douze livres, avec la vitesse constante d'un pouce par seconde ; c'est-à-dire que la machine se remonte continuellement d'elle-même et que de plus il reste une force disponible quadruple de celle que devrait employer un [agent extérieur qui aurait à entretenir par lui-même le mouvement de cette machine.

« Il résulte de cet exposé que, dans la machine de M. Cagniard, la chaleur quintuple au moins le volume de l'air qui lui est confié, puisqu'il est évident que l'effet produit doit être proportionnel au volume de cet air dilaté, au moins à cause des frottements qu'il faut vaincre ; mais ces frottements sont peu de chose, parce que la vis et la roue étant l'une et l'autre plongées dans l'eau, perdent une partie considérable de leur poids, et prennent conséquemment peu sur leurs tourillons. D'ailleurs les mouvements sont toujours lents et non alternatifs, il ne se fait aucun choc ; ainsi cette machine est exempte de résistances qui absorbent ordinairement une grande partie de la force mouvante dans les machines, et en accélèrent la destruction.

« La machine inventée par M. Cagniard peut devenir fort utile dans un grand nombre de circonstances : comme elle produit son effet dans une masse d'eau échauffée seulement à 75 degrés, et même moins, elle donne lieu de profiter des eaux chaudes que, dans plusieurs manufactures ou établissements on rejette souvent comme inutiles. .... Cette machine qui est sujette aux frottements et aux

réparations, a de plus l'avantage d'être facile à conduire; lorsqu'on suspend son action pour quelque temps sans éteindre le feu, la chaleur n'est point perdue, parce que l'eau n'étant pas bouillante, le calorique s'y accumule et fournit ensuite une action plus considérable. »

Si la machine fort ingénieuse dont ce rapport expose si bien les principes, n'est pas entrée dans le domaine des applications, cela tient sans doute à la dépense de combustible qu'exigerait le maintien d'une température assez élevée dans l'eau de la cuve. Mais cet inconvénient ne subsiste plus dans les régions où l'on peut recourir à l'emploi de la chaleur solaire. Car très-certainement il y suffira d'un réflecteur de médiocre étendue pour porter et maintenir le volume d'eau convenable même à la température de 100°. En remarquant de plus, combien il est facile de préserver une grande masse d'eau du refroidissement à l'aide de la cloison vitrée qui permet d'y concentrer les rayons solaires, ou d'un écran semblable à celui que proposait Ducarla, on conçoit la possibilité de se ménager durant le jour une provision d'eau chaude pour la nuit, et de faire ainsi fonctionner la machine d'une manière continue. Peut-être serait-il encore avantageux de substituer à la cuve un espace annulaire renfermant l'eau chaude et d'y installer une turbine au lieu de la roue à augets. Mais c'est aux hommes spéciaux qu'il appartient de résoudre de pareilles questions.

Examinons maintenant s'il n'est pas possible d'obtenir au soleil assez de chaleur pour alimenter des moteurs plus énergiques et plus généralement employés que ceux qui précèdent.

A en juger par les sourires d'incrédulité qu'elle excitait

en 1861, même chez des personnes compétentes, ce devait être une tentative en apparence bien présomptueuse que celle de substituer au combustible les rayons du soleil pour chauffer une machine à vapeur. On a vu cependant que l'idée en était venue à Oliver Evans, et que l'ingénieur de la Cliche avait immédiatement conçu le projet d'une machine à vapeur solaire, au récit des effets que se flattait d'obtenir Ducarla. Il est vrai que les prétentions de Ducarla sous ce rapport étaient exagérées et que de la Cliche ne semble pas avoir donné suite à son projet. Mais, les belles recherches de Pouillet et de sir John Herschel ne pouvaient manquer d'appeler de nouveau l'attention sur une question de cette importance.

Interrogeons d'abord le calcul sur ce point, en nous appuyant, bien entendu, sur des données expérimentales.

On sait qu'une surface d'un mètre carré, normalement exposée aux rayons du soleil, reçoit par minute, à Paris, jusqu'à treize calories dans les circonstances les plus favorables. Il est donc probable que dans celles des régions équatoriales où l'air est le plus sec, ce flux de chaleur s'élève au moins à quinze calories. Or, quinze calories par minute donnent :

$$15 \times 60 = 900 \text{ calories par heure.}$$

Cela posé, quelle est la quantité de chaleur nécessaire pour faire marcher pendant une heure une machine de la force d'un cheval ? Cette quantité dépend, comme on le sait, de la tension de la vapeur, de la manière dont se fait la condensation, de la détente, etc. Ainsi, une machine à basse pression consomme de cinq à six kilog. de houille

par force de cheval et par heure. Une machine à moyenne pression, à détente et à condensation n'en exige que deux ou trois kilog. Enfin une machine à haute pression en consomme de quatre à cinq kilog. Prenons pour terme de comparaison les machines à moyenne pression de Cornouailles qui ne brûlent que deux kilog. de houille par force de cheval et par heure. Comme la combustion d'un kilogramme de houille développe 7,500 calories, et que les meilleurs foyers ne permettent guère d'utiliser que la moitié de cette quantité de chaleur, il en résulte que les machines de Cornouailles dépensent 7,500 calories par heure et par force de cheval. Divisant ce nombre par les 900 calories qui répondent à une surface d'insolation d'un mètre carré, on trouve pour quotient 8. Ainsi, un réflecteur ayant la forme d'un carré de trois mètres de côté peut dans certaines contrées recueillir plus que la quantité de chaleur nécessaire pour alimenter une machine d'un cheval. Le calcul fondé sur les données de l'expérience établissait donc la possibilité de faire marcher au soleil une machine à vapeur. Il restait à essayer d'atteindre ce but par des moyens essentiellement pratiques : ce fut là, tout d'abord, l'objet principal de mes recherches.

Toutefois j'ai dû commencer par constater l'action de la chaleur solaire sur l'air confiné parce que les essais de ce genre n'offraient pas de difficultés sérieuses, et qu'ils étaient très-propres à faire voir avec quelle promptitude les rayons du soleil peuvent se convertir en force vive. Après avoir mené ces premières expériences à bonne fin, grâce au concours d'un habile et intelligent ouvrier, M. Villate, d'Alençon, je n'ai plus guère songé qu'à étendre les applications mécaniques de la chaleur solaire

à la machine à vapeur elle-même. Il fallait, dans ce dessein, commencer par obtenir assez rapidement au soleil l'ébullition de l'eau ; puis créer un générateur solaire capable d'alimenter une petite machine à basse ou à moyenne pression ; enfin produire avec une surface d'insolation restreinte le volume de vapeur nécessaire en pareil cas, sans quoi la solution du problème n'eut pas été pratique. Ces nouvelles tentatives ne furent pas moins heureuses que les précédentes : elles eurent pour résultat la réalisation complète du progrès que j'avais en vue. Peut-être ne verra-t-on pas sans intérêt les essais qui m'y ont conduit.

Parmi les générateurs solaires dont j'ai déjà donné la description, ce fut celui dont la fig. 18 représente la coupe qui me fit le mieux pressentir le succès de mon entreprise. Il suffisait, en effet, de voir combien l'ébullition du liquide y devenait tumultueuse, et avec quelle force la vapeur lançait à un instant donné le bouchon de liége que l'on enfonçait dans le col de la chaudière, pour conclure à la possibilité de faire travailler cette vapeur. M. Hempel, l'habile constructeur d'instruments de physique, chez qui j'ai toujours trouvé l'extrême obligeance et les conseils dont on a si souvent besoin dans de sémblables recherches, ayant bien voulu faire exécuter tout exprès pour mon appareil une petite machine du genre de celles qu'on chauffe avec une lampe à alcool, je l'ai fixée au col de la chaudière, et, au mois de juin 1866, je l'ai vue fonctionner à merveille au bout d'une heure d'insolation. Je dois ajouter que, dans cette circonstance, le succès a dépassé mon attente, puisque le même récepteur solaire a suffi pour entretenir le mouvement d'une seconde machine beaucoup plus grande que la première.

Loin de m'en tenir à ces résultats déjà satisfaisants, j'ai cherché d'une part à simplifier la construction du générateur, et d'autre part à favoriser, autant que possible, la vaporisation du liquide. A cet effet, j'ai fait souder sous la



Fig. 33.

plate-forme circulaire qui supportait ma seconde machine à vapeur une chaudière en cuivre dont la figure ci-jointe représente la coupe. Cette chaudière était une espèce de manchon formé de deux cylindres concentriques de hauteurs inégales, reliés l'un à l'autre par leur base inférieure. Le plus grand cylindre, afin d'offrir une surface de chauffe suffisante, avait 25 centimètres de hauteur et un décimètre de diamètre. Il était, d'ailleurs, noirci en dehors. On y introduisait l'eau par une ouverture pratiquée dans la plate-forme de la machine ; puis on fermait cette ouverture à l'aide d'un bouchon à vis portant la soupape de sûreté. Le plus petit cylindre n'étant destiné qu'à diminuer la capacité du plus grand et restant vide comme le fond d'une bouteille ordinaire, le liquide à vaporiser n'avait qu'une assez faible épaisseur, et pouvait

par suite s'échauffer rapidement. Il occupait à peu près la moitié de l'espace compris entre les deux cylindres. Le reste de cet espace était destiné à servir de chambre à la vapeur, qui de là devait se rendre, à travers une seconde ouverture de la plate-forme, d'abord dans le tiroir de la machine, puis dans le corps de pompe, pour s'échapper ensuite dans l'atmosphère.

Ainsi préparée, la chaudière était introduite dans un bocal en verre sur les bords duquel s'appuyaient ceux de la plate-forme ; et l'appareil étant placé au foyer du réflecteur, la machine n'exigeait qu'une demi-heure d'insolation pour fonctionner aussi bien qu'avec une lampe à alcool.

Enfin, comme j'étais loin d'utiliser de la sorte toute la chaleur recueillie par le réflecteur, parce que la ligne focale de ce dernier surpassait la hauteur de la chaudière, j'ai cru devoir adopter pour le générateur la disposition suivante qui m'a donné les résultats les plus satisfaisants.

La chaudière en cuivre, fig. 34, était formée de deux enveloppes concentriques en forme de dé à coudre, soudées l'une à l'autre par leur base. La plus grande enveloppe, haute de quarante centimètres était noircie en dehors : la plus petite était vide. L'eau se logeait sous une assez faible épaisseur entre les deux enveloppes. On l'introduisait par un bouchon à vis A ; la chaudière en contenait deux litres ; la vapeur devait se rendre par le tube abducteur B et le robinet C dans la machine annexée à la chaudière.

Cette chaudière installée sur un disque en bois, recouverte d'une cloche de verre mince et placée au foyer du réflecteur a fait bouillir en une heure deux litres d'eau pris à la température initiale de 10°. En d'autres termes, j'ai pu recueillir de la sorte trois calories par minute. Dans les

mêmes circonstances, un réflecteur d'un mètre carré d'ouverture eût donc utilisé six calories. Si l'on observe qu'un

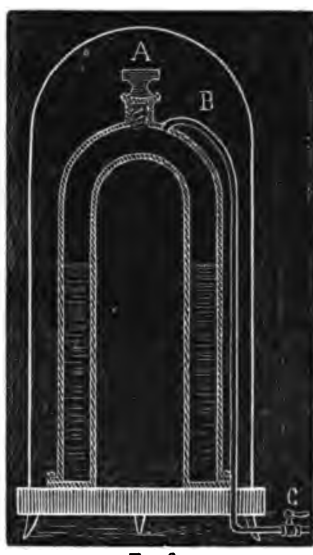


Fig. 34.

kilogramme d'eau à 100° exige 537 calories pour se transformer en vapeur, on trouve que la chaudière en question munie d'un pareil réflecteur eût vaporisé ce poids de liquide en 537 : 6 = 90 minutes, c'est-à-dire qu'elle eût fourni 19 litres de vapeur à la minute. Il est bon d'ajouter que le miroir en plaqué d'argent, loin d'être bruni avec soin, était assez terne, parce que je l'avais à dessein laissé depuis longtemps à l'air libre.

Après avoir essayé l'effet de ce nouveau générateur sur ma seconde machine, j'ai pensé que la tension de la vapeur ainsi obtenue suffirait pour entretenir le mouvement d'une machine du grand modèle de M. Hempel. Il s'agissait cette fois de vaincre les frottements d'un mécanisme assez com-

pliqué et même de produire un effet utile, puisque la machine munie de sa pompe alimentaire, de son régulateur à boules, etc., devait en outre mouvoir une vis d'Archimède destinée à élever l'eau.

La vapeur fournie par la chaudière dans le cas d'un réflecteur d'un demi-mètre carré d'ouverture n'a suffi que tout juste pour faire marcher l'appareil. Encore fallait-il attendre assez longtemps pour laisser monter cette vapeur en pression. Mais avec un miroir cylindro-parabolique, qui lançait à la chaudière environ six calories par minute, l'appareil fonctionnait à merveille. Ajoutons que pour montrer l'influence du verre en pareil cas, même par un temps calme, il suffisait d'enlever la cloche au milieu de l'expérience; car, le mouvement se ralentissait aussitôt et finissait par s'arrêter, tandis que pour le voir renaître un instant après on n'avait qu'à remettre cette cloche en place. Il est bon de dire aussi qu'un petit manomètre adopté à la chaudière montrait la possibilité d'atteindre assez vite à la pression de deux atmosphères, et que les parois de cette chaudière n'étaient pas assez résistantes pour permettre de chauffer davantage la vapeur.

C'est ainsi que le problème de la machine solaire à vapeur d'eau s'est trouvé complétement résolu à Paris dans les premiers jours d'août 1867. On doit juger par là des résultats qu'il est possible d'obtenir dans les régions intertropicales où le soleil est ardent et le ciel pur durant des mois entiers. Il est vrai que les essais dont je viens de parler n'ont pas encore reçu la sanction de l'expérience en grand. Mais, dans une question de ce genre, le plus difficile était de réussir avec de petits appareils, parce que les frottements ont alors une telle importance qu'il faut employer, pour

les vaincre, une force relativement considérable, et qu'une surface d'insolation restreinte pouvait ne pas offrir les mêmes avantages que l'esprit de vin ou le charbon.

Depuis les expériences que je viens de mentionner, j'ai fait construire une forte chaudière à peu près de même forme que celle de la figure 34, mais pouvant contenir 6 litres d'eau.

Les résultats fournis par cette chaudière sont venus confirmer de tout point mes prévisions. C'est-à-dire qu'il m'a été facile, avec un réflecteur d'un mètre carré d'ouverture, d'obtenir rapidement de la vapeur à 4 et 5 atmosphères, la résistance des parois de la chaudière ne permettant pas de dépasser cette limite.

Si les générateurs solaires dont je viens de donner une idée ne peuvent fonctionner d'une manière continue comme ceux qu'on chauffe avec le combustible, ils ont sur ces derniers plusieurs avantages. D'abord toute leur surface extérieure est une surface de chauffe, avec cette différence cependant que la paroi soumise à l'insolation directe est à une température moindre que celle qui regarde le réflecteur. En second lieu, ces appareils s'échauffent avec une grande régularité et la vitesse d'échauffement y est réglée par l'étendue de la surface d'insolation. Or, c'est là, comme il est facile de s'en convaincre, un précieux avantage. On sait, en effet, que les foyers ordinaires, à cause de leurs brusques variations de température, ne permettent ni de dépasser pour la vapeur d'eau les pressions de 8 à 9 atmosphères, ni de vaporiser les liquides les plus volatils, tels que l'alcool, l'éther, le chloroforme, etc... Il peut cependant être utile de faire travailler la vapeur d'eau à 10 ou 12 atmosphères, surtout si l'on parvient à réaliser

d'une manière satisfaisante la machine à vapeur surchauffée. De plus, les liquides très-volatils ont une capacité calorifique et une chaleur latente de vaporisation beaucoup moindres que celles de l'eau : ils sont conséquemment susceptibles d'acquérir des tensions considérables à des températures relativement assez basses. Mais les dangers d'explosion qu'ils présentent lorsqu'on les chauffe avec la houille ou tout autre combustible ont dû faire renoncer à leur emploi. Si donc, comme tout porte à le croire, les récepteurs solaires n'offrent pas les mêmes inconvénients, rien n'empêchera dorénavant de tirer parti d'une aussi précieuse ressource. Il paraît même que les rayons du soleil sont incapables d'enflammer les liquides de cette espèce. C'est du moins ce qu'on a pu constater pour l'alcool, en le plaçant au foyer des plus fortes lentilles. De là, par conséquent, de nouvelles garanties de sécurité dans ces sortes d'applications.

DEGRÉS de TEMPÉRATURE.	FORCES ÉLASTIQUES EN CENTIMÈTRES DE MERCURE.				
	EAU.	ALCOOL.	ÉTHER.	SULFURE de CARBONE	CHLOROFORME
40	5	13	91	61	36
50	9	22	126	85	52
60	14	35	173	116	73
70	23	54	231	155	97
80	35	81	294	203	137
90	52	119	390	262	181
100	76	168	492	332	235
110	107	235	624	413	301
120	149	320	«	512	381
130	203	433	«	626	472
140	271	563	«	«	«
150	358	725	«	«	«

Afin de mieux faire juger des résultats qu'il est permis d'espérer de l'emploi des liquides plus volatils que l'eau, je me borne à citer la table précédente due aux savantes recherches de M. Regnault, et dans laquelle $0^m,76$ de mercure représentent une atmosphère.

On pourrait craindre que la nécessité de diriger constamment le réflecteur vers le soleil fut un grave inconvénient dans la pratique ; mais une telle crainte serait mal fondée. Car, dans mes expériences, la position du miroir avait à peine besoin d'être changée de demi-heure en demi-heure, bien que, pour des raisons d'économie, ce miroir ne fut pas d'un emploi très-commode, puisqu'il fallait l'incliner de façon à faire tomber obliquement les rayons réfléchis sur la chaudière, tandis que celle-ci restait verticale. Il sera d'ailleurs toujours facile d'approprier la forme et la disposition des récepteurs solaires aux exigences du climat comme aux besoins de l'industrie. Admettons par exemple qu'on veuille employer une chaudière cylindrique et un miroir cylindro-parabolique. Pour simplifier en chaque lieu le mouvement d'orientation de l'appareil il suffira de maintenir l'axe de la chaudière dans une direction parallèle à l'axe terrestre. Car, de cette façon, le miroir ayant pour ligne focale l'axe même de la chaudière, n'aura besoin de tourner, comme le soleil, que d'un angle de 15 degrés par heure ; et, à défaut d'un homme, rien n'empêchera d'employer quelque mécanisme analogue à celui de tourne-broche pour en régler le mouvement. L'effet de cette disparition serait assez avantageux dans le voisinage de l'équateur, car l'axe de la chaudière y serait à peu près horizontal. Au reste, on pourrait également dans ces contrées laisser la chaudière verticale à la condi-

tion de l'échauffer avec un réflecteur conique formant collerette autour de sa base. On voit par là que l'orientation des récepteurs solaires suivant les heures du jour ou les époques de l'année ne saurait offrir aucune difficulté. Je passe donc à d'autres considérations.

Je n'ai parlé jusqu'ici que de l'application des récepteurs solaires aux machines à vapeur ou à des machines à air n'exigeant pas de grandes élévations de température. Mais on sait que l'industrie sans cesse en quête d'améliorations nouvelles essaie depuis quelque temps de remplacer les vapeurs, dont la condensation entraîne une perte énorme de travail, par d'autres agents, tels que l'air chaud, l'ammoniaque, etc. Les appareils que l'on a conçus et mis à exécution dans ce dessein sont déjà nombreux, et semblent appelés à un grand avenir. Tous ayant sur la machine à vapeur l'avantage de convertir en travail une plus grande partie de la chaleur développée par le combustible, il importe d'examiner s'il ne serait pas possible de les chauffer au moyen de la chaleur solaire et de réaliser de la sorte dans certaines contrées une économie plus grande encore.

En première ligne, par ordre d'ancienneté, vient la machine à air chaud. Bresson en 1821, Ericsson, en 1852, puis MM. Franchot, Lemoine, Pascal, Belou, Laubereau, lui ont successivement apporté de notables perfectionnements. Sans entrer ici dans le détail des appareils imaginés par ces divers inventeurs, je dirai quelques mots de l'ingénieuse machine de M. Laubereau, parce qu'elle m'a paru susceptible de fonctionner au soleil dans d'excellentes conditions.

L'organe principal de cette machine est un grand cylin-

dre vertical renfermant de l'air confiné. La base inférieure du cylindre est chauffée au charbon ou au gaz ; la base supérieure est munie d'un double fond où circule de l'eau destinée à la refroidir. Un écran ayant la forme d'un piston rempli de plâtre monte et descend librement dans le cylindre et, suivant qu'il s'applique sur la base inférieure ou sur la base supérieure de ce dernier, l'air confiné se refroidit ou s'échauffe. Le grand cylindre communique par un tuyau avec la partie inférieure d'un corps de pompe vertical, ouvert par le haut et dans lequel se meut le piston moteur. Ce piston monte quand l'air confiné s'échauffe, et redescend par l'effet de son poids et de la pression atmosphérique quand le gaz se refroidit. Les pièces accessoires de l'appareil ont pour but de régler la marche du piston moteur et de l'écran et de mettre en mouvement une petite pompe destinée à renouveler l'eau dans le double fond du grand cylindre. Tel est, en principe, la machine de M. Laubereau. Il serait trop long d'entrer ici dans le détail des dispositions ingénieuses qui permettent à l'air confiné de se refroidir et de s'échauffer rapidement. Mais ce qu'il importe de faire remarquer, c'est qu'un récepteur solaire s'adapterait à la machine sans exiger, pour ainsi dire, aucune modification. Il y a plus, ce récepteur permettrait d'intervertir les rôles pour les bases du grand cylindre, c'est-à-dire de chauffer la base supérieure, tandis que le courant d'eau froide serait dirigé sur la base inférieure, ce qui paraît devoir être plus avantageux. Quant à la provision de chaleur exigée par la machine pour fonctionner dans de bonnes conditions, une surface d'insolation restreinte pourrait facilement la fournir ; c'est là par conséquent un essai qui vaudrait la peine d'être tenté.

Une autre machine qui semble devoir se prêter à merveille aux applications mécaniques de la chaleur solaire, c'est le moteur à ammoniaque de M. Frot. Cet habile ingénieur a eu l'idée de remplacer l'eau des chaudières à vapeur par une dissolution de gaz ammoniaque, et d'utiliser la pression qui se développe dans la masse liquide dès qu'on vient à l'échauffer. On sait qu'un litre d'eau à 15° dissout 743 litres de gaz ammoniac, et que si l'on porte le liquide à l'ébullition, le gaz tend à se dégager en exerçant sur les parois des vases clos où on le renferme une pression qui s'accroît rapidement avec la température. Cette pression est de 7 atmosphères et demie à 100°, et de 10 atmosphères à 120°. De plus, tandis que la chaleur latente de vaporisation de l'eau à 100° est de 537 calories, celle de l'ammoniaque n'est que de 126 calories. On conçoit donc que la machine de M. Frot réalise une grande économie de combustible et fournisse à bon marché une force motrice considérable. Si l'on ajoute à cela que l'appareil se met immédiatement en marche dès qu'on allume le feu sous la chaudière, et que l'ammoniaque, en saponifiant les huiles et les graisses, fournit une sorte d'enduit qui s'oppose aux fuites, il est difficile de ne pas fonder de grandes espérances sur l'avenir de ce nouveau moteur, et de ne pas reconnaître en même temps qu'il paraît très-propre à fonctionner au soleil.

Je n'aurais rien à ajouter à ce qui précède, si, pendant que je rassemblais les matériaux de cet ouvrage, les résultats obtenus en Amérique par un illustre ingénieur, engagé comme moi dans la voie des applications mécaniques de la chaleur solaire, n'étaient venus corroborer les miens.

Vers la fin de 1868, un journal des États-Unis apportait

la nouvelle qu'Ericsson venait d'inventer des machines à vapeur et à air chaud mues par le soleil. Du reste, aucun détail sur les appareils imaginés par le grand ingénieur, dont la science déplore en ce moment la perte. Une lettre d'Ericsson aux nombreux amis qu'il comptait en Suède n'est pas plus explicite à cet égard. Néanmoins, faute de meilleurs renseignements, je vais en reproduire une traduction que j'ai lieu de croire fidèle. Ericsson, dans cet écrit, ne rend pas suffisamment justice aux travaux de sir John Herschel et de Pouillet, car ses essais, comme les miens, ont pour but de réaliser des phénomènes que les nombres obtenus par les deux éminents physiciens permettaient de prévoir. Mais, à cela près, sa lettre mérite d'être signalée comme renfermant des résultats utiles à recueillir. Qu'on en juge plutôt.

« Les expériences bien connues de sir John Herschel et de M. Pouillet, malgré tout l'intérêt qu'elles offrent, ne sont pas assez satisfaisantes, parce qu'elles ne s'étendent qu'à des températures peu élevées. Elles montrent seulement quel poids de glace le soleil est capable de fondre dans un temps déterminé, ou quel degré de chaleur il peut donner à l'eau sans lui faire atteindre néanmoins son point d'ébullition. L'objet de mes recherches et de mes expériences a été de découvrir quelle est la somme de chaleur qui se dégage dans les hautes températures produites par la concentration des rayons solaires sur une surface restreinte, et quels sont les meilleurs moyens d'amener une telle concentration.

« Pendant le cours de cette année, j'ai construit trois machines en vue d'obtenir une force motrice, et je les ai nommées machines solaires. Une de ces machines est mise

en mouvement par la vapeur que produit la concentration des rayons calorifiques; les autres sont mues par la force expansive de l'air atmosphérique directement échauffé par la chaleur concentrée.

« La place me manque pour une description de ces machines et des appareils que j'ai construits dans le dessein de concentrer la chaleur rayonnante et de produire la haute température nécessaire; je suis donc obligé de limiter mon exposé à la partie principale du sujet, c'est-à-dire à la force motrice elle-même.

« Conséquemment, je vous dirai que, d'après mes expériences, lorsque les machines à vapeur et à air chaud sont à la température nécessaire, l'action du soleil sur une surface de 10 pieds au carré (9 mq., 2899) est capable de vaporiser 489 pouces cubes (8 lit., 013243) d'eau par heure au moyen de mes appareils de concentration.

» On ne peut trop apprécier l'importance de ce résultat en considérant qu'une telle vaporisation dénote un flux de chaleur capable d'élever 35,000 livres à 1 pied de haut en une minute; ce qui est plus que l'équivalent du cheval-vapeur.

» Cette preuve expérimentale de la puissance calorifique du soleil est d'une plus grande valeur que l'application d'aucune autre vérité physique, quelle qu'elle soit.

» Si l'on réfléchit que la distance moyenne du soleil à la terre est 21,444 fois plus grande que le rayon du soleil, on trouve, en faisant le carré de ce nombre, qu'un seul pied carré de la surface du soleil échauffe 45,984 pieds carrés sur la terre, ou, en d'autres termes, qu'à égalité de surface, le soleil envoie 45,984 fois plus de chaleur que la terre n'en reçoit.

» De ce résultat expérimental, on peut conclure avec certitude qu'un carré de 10 pieds de côté à la surface du soleil produit assez de chaleur pour faire mouvoir une machine à vapeur de la force de 45,984 chevaux, ce qui équivaut à une consommation de charbon de plus de 100,000 livres par heure. Mais, dans ce calcul, on n'évalue pas assez haut la vraie somme de chaleur émise par le soleil. Plus de la moitié de cette somme se perd dans le trajet des rayons calorifiques à travers l'atmosphère et dans les appareils de concentration. La chaleur solaire émise par une surface de 100 pieds carrés correspond donc à la combustion de plus de 200,000 livres de charbon par heure. L'intensité d'un phénomène calorifique qui se traduit par une pareille consommation de houille dépasse l'imagination. On peut encore moins se figurer la nature et la masse de la matière en ignition, si l'on songe qu'une chaleur aussi intense est répartie sur toute la surface d'un globe dont le diamètre excède cent fois celui de la terre. Je n'ai pas le dessein de vous soumettre mes réflexions sur l'essence de cet astre merveilleux; sa richesse très-suffisante (malgré le grand éloignement) comme source de force motrice, et le parti que nous pouvons en tirer feront seuls l'objet de ce court exposé.

» Ce que j'ai dit de mes expériences, et les résultats qu'elles ont fournis, prouvent que, sans donner une étendue trop grande aux appareils de concentration, on peut se procurer assez de force pour atteindre des buts pratiques. Le calcul que je viens de finir pour évaluer l'effet mécanique de la chaleur solaire tombant sur les toits de Philadelphie, montre qu'avec cette chaleur on peut mettre en mouvement plus de cinq mille machines à vapeur de la

force de 20 chevaux chacune. Une qualité précieuse de la nouvelle force motrice, c'est qu'on peut la recueillir sans occuper d'espace utile. Et, puisqu'il est question d'espace, je ne puis résister au désir de vous faire connaître, par le calcul, la quantité de force qu'on peut recueillir en couvrant un mille suédois d'appareils de concentration et de machines solaires.

» Admettons qu'on emploie la moitié de la surface en bâtiments, chemins, etc. Il reste alors 18,000 × 36,000 = 648,000,000 pieds carrés de surface sur lesquels on peut concentrer la chaleur rayonnante. Et, puisque mes expériences avec les appareils de concentration démontrent que 100 pieds carrés sont plus que suffisants pour produire une force d'un cheval, il s'ensuit qu'on peut mettre en mouvement 64,800 machines à vapeur de la force de 100 chevaux chacune à l'aide de la chaleur rayonnée par le soleil sur un mille suédois carré. Archimède, après l'achèvement d'un calcul sur la force du levier, disait qu'il pourrait soulever le monde. Moi, je prétends que la concentration de la chaleur rayonnante du soleil produirait une force capable d'arrêter la terre dans sa marche.

» En Angleterre, on commence à calculer l'époque où la houille fera défaut, bien que les mines de ce combustible soient, pour ainsi dire, d'exploitation récente. Quelques milliers d'années, gouttes dans l'océan du temps, épuiseront les mines de charbon de l'Europe, si, dans cet intervalle, on n'a recours à l'assistance du soleil. Il est bien vrai que les rayons solaires n'arrivent pas toujours jusqu'à la surface du sol ; mais quand s'ouvrira le grand magasin donnant le chauffage gratuit, sans dépenses de transport, l'ingénieur prudent saura bien approvisionner le magasin

de réserve pour les jours nuageux. Remarquons en même temps qu'une grande partie de la surface de la terre est éclairée par un soleil toujours radieux. La sphère d'activité de la machine solaire est aussi grande que la puissance dynamique en est considérable.

» Avant de terminer cette relation incomplète, permettez-moi de vous demander qui peut prévoir l'influence qu'une force motrice inépuisable est capable d'exercer sur la civilisation, comme sur l'étendue des ressources que la terre offre au genre humain.....

« Vous n'apprendrez assurément pas sans plaisir que d'autres appareils de concentration pour les machines à vapeur, exécutés avec plus de précision qu'auparavant, donnent mieux que la vaporisation de 489 pouces cubes d'eau par heure et par surface de 100 pieds carrés. J'écris cette lettre ayant devant moi une machine solaire qui bat 150 coups à la minute : le but en est de mesurer la contenance cubique de la vapeur produite. Les expériences de vaporisation sont déjà tout à fait réalisées : ainsi, l'appareil n'est plus seulement à l'état de projet. C'est maintenant une vérité pratique que, dans l'avenir, on tiendra pour un des auxiliaires les plus indispensables de l'humanité. »

Dans cette lettre on pourrait, sans inconvénient, supprimer les passages relatifs à la puissance dynamique du soleil, car il y a longtemps que Pouillet a publié à ce propos des calculs beaucoup plus exacts que ceux d'Ericsson. Le point essentiel à noter ici, c'est la vaporisation en une heure d'environ 8 litres d'eau pour une surface d'insolation de 9 ^{mq}, 28. Comme un litre d'eau exige à peu près 537 calories pour se réduire en vapeur, la quantité de chaleur recueillie dans cette circonstance est 9,28 × 537

= 4303^{c} ; ce qui fait 4303 : 60 = 71^{c}, 7 à la minute. Il en résulte qu'Ericsson a recueilli 71,7 : 9,28 = 7^{c},7 par minute et par mètre carré. Si l'on tient compte des circonstances favorables où il opérait, on verra que ce résultat s'écarte si peu des miens (puisqu'à Tours j'ai obtenu entre 6 et 7 calories par minute et par mètre carré), que les appareils de concentration dont il s'est servi n'étaient pas, comme il le reconnaît, du reste, lui-même, construits avec toute la précision désirable.

Rien dans la lettre d'Ericsson ne peut nous éclairer sur la puissance des machines solaires qu'il a créées, en sorte qu'on ne sait si elles avaient réellement une surface d'insolation de 9 mètres carrés, ou s'il ne donne ce nombre que comme l'équivalent du cheval-vapeur. Selon toute probabilité, ce n'étaient encore là que des machines d'essai semblables aux miennes. Mais, pour n'avoir reçu d'application que sur une petite échelle, la solution du problème n'en était pas moins complète.

Ericsson déclare d'ailleurs n'avoir construit ses machines que dans le courant de l'année où il écrit sa lettre, c'est-à-dire en 1868. Or, si l'on veut bien se rappeler que dès l'année 1866 j'avais déjà deux petites machines à vapeur fonctionnant au soleil de Tours, on me contestera d'autant moins le mérite d'avoir devancé l'illustre ingénieur américain que je n'ai jamais fait mystère à personne de mes expériences. Au reste, quand une application nouvelle est près d'éclore, il est bien rare que deux ou plusieurs personnes n'en aient pas l'idée presque en même temps : comme on l'a déjà dit plus d'une fois, il semble que cette idée soit dans l'air. Je dois ajouter qu'un brevet d'un an pris le 4 mars 1861 pour mon récepteur

solaire assure à la France la priorité de ce genre d'essais.

Si, par ordre de dates, Ericsson n'est pas le premier inventeur des machines solaires à vapeur, ou même à air chaud, on ne peut nier que, grâce au triple ascendant de son génie, de sa fortune et d'une longue expérience, il n'eût puissamment contribué aux progrès de cette nouvelle branche d'application. Sa mort, regrettable à plus d'un titre, l'est donc particulièrement au point de vue des essais qui ont couronné sa longue et belle carrière. Espérons, du moins, que son illustre exemple sera suivi dans sa patrie adoptive, et que l'Amérique saura dignement soutenir la concurrence avec l'Europe relativement aux applications de la chaleur solaire, comme elle l'a déjà fait pour tant d'autres inventions.

CONCLUSION.

—

Nous avons essayé d'appeler l'attention sur les ressources que le soleil offre à l'industrie humaine et sur les moyens d'en tirer parti. Maintenant que notre tâche est à peu près remplie, qu'on nous permette encore à ce propos quelques remarques essentielles, sous forme de conclusion.

Pour assurer le succès d'une application naissante, il ne suffit pas de montrer combien les principes en sont rationnels, ni d'apprendre jusqu'à quel point elle a reçu la sanction de l'expérience; il faut encore ne rien négliger pour en faire connaître le véritable but et dissiper autant que possible les préventions dont elle peut être l'objet. C'est donc un devoir pour nous d'essayer de répondre aux critiques, d'ailleurs généralement bienveillantes, qui ont accueilli l'annonce d'essais relatifs à l'emploi industriel de la chaleur solaire.

Une objection qu'on nous a souvent adressée est la suivante :

Quels services attendre du soleil, les jours de pluie, de brouillard, ou simplement quand le ciel est couvert de nuages ?

Certes, si, partout à la surface du globe, l'état du ciel était aussi variable que dans nos climats, il n'y aurait

guère lieu de compter sur une pareille ressource. A peine trouverait-on dans le cours de l'année quelques séries de beaux jours permettant de recueillir sans trop d'intermittences les rayons du soleil. Encore, faudrait-il n'employer à cet effet que des appareils d'un prix médiocre pour ne pas voir les frais d'installation excéder de beaucoup les bénéfices. D'ailleurs les sources naturelles de travail, et surtout l'abondance du combustible dispensent dans nos contrés de recourir à l'emploi direct de la chaleur solaire. Mais s'agit-il des régions intertropicales, la question change de face et prend tout à coup de l'importance. C'est qu'en effet dans ces régions, le ciel reste pur durant des mois entiers, en sorte qu'il est possible de recueillir régulièrement les rayons du soleil dix à douze heures par jour, et quels rayons ! Leur trajet presque vertical dans l'atmosphère, la fraîcheur des nuits qui débarrasse l'air d'une partie de sa vapeur d'eau, tout concourt à les rendre d'une ardeur extrême. Aussi, comme le soleil verse alors à flots sur la terre ses inépuisables trésors ! Ecoutez plutôt le spirituel auteur d'Ahmed le fellah :

« Le soleil luit pour tout le monde, dit-on ; n'en croyez rien. Ce disque blanc, jaunâtre et parfois rouge que les peuples du Nord voient descendre à l'horizon quand les nuages ne le cachent pas, n'est que la pâle et triste image du soleil Osiris, dieu puissant en Égypte, qui se lève dans une éruption et se couche dans un incendie. »

Il faut lire l'ouvrage entier de M. Edmond About, il faut se pénétrer de cette étude aussi profonde qu'attrayante sur les ressources de l'Égypte pour comprendre toute l'étendue des services que peut rendre dans certaines contrées l'emploi direct de la chaleur solaire.

Si l'Égypte, par exemple, a, malgré ses aspirations nouvelles, tant de peine à se relever de ses ruines, ce n'est pas que l'antique berceau des sciences et des arts ait cessé d'être la terre privilégiée par excellence. Outre le soleil qui lui prodique ses rayons, le Nil est pour elle, comme autrefois, une source abondante de richesse. Mais, par suite du manque de bras il faudrait des machines pour diriger dans les terres les eaux fécondantes du fleuve nourricier ; et comment alimenter ces machines dans un pays où le prix de la houille varie de cinquante à cent francs la tonne? Il y a mieux, ce n'est pas seulement le défaut de charbon qui se fait sentir dans toute la contrée, le bois lui-même y est tellement rare que l'unique ressource du fellah pour cuire sa nourriture est la fiente d'animaux desséchée. Ce qui manque essentiellement à l'Égypte, c'est donc le combustible à bas prix ou quelque ressource équivalente. Mais le soleil, son ancien dieu tutélaire, ne peut-il pas, comme nous croyons l'avoir prouvé, lui fournir une provision de chaleur suffisante et pour les applications industrielles et pour les besoins ordinaires de la vie? Qu'elle essaie donc d'en utiliser les rayons. Là peut-être est le secret de sa force. Là du moins, à coup sûr, est une des garanties de sa prospérité.

Ce que nous venons de dire à propos de l'Égypte doit à plus forte raison s'appliquer aux contrées où l'ardeur du soleil est excessive, parce que toutes les autres sources naturelles de travail y tarissent à la fois. L'extrême chaleur, en effet, n'est-elle pas moins une cause de désolation que les froids les plus intenses? Sous un ciel de feu, l'homme et les animaux perdent de leur énergie ; l'eau manque le plus souvent, soit qu'on ne la rencontre qu'à de

grandes profondeurs, soit qu'elle forme, comme au Sahara, des rivières souterraines coulant dans le sable à une faible distance du sol. En même temps la végétation disparaît ou ne se montre que par places : ses débris ne fournissent plus le combustible nécessaire aux besoins de la vie ; et c'est ainsi que de vastes régions restent fermées à l'homme ou ne servent tout au plus de refuge qu'à des tribus à demi sauvages. C'est donc surtout alors, on ne saurait en disconvenir, qu'il convient d'utiliser les rayons du soleil, d'endiguer en quelque sorte cette force dévastatrice et d'en faire pour l'espèce humaine, au lieu d'un fléau, l'un de ses plus puissants auxiliaires.

Qu'on y prenne garde d'ailleurs ! Si dans nos climats l'industrie peut se passer de l'emploi direct de la chaleur solaire, il arrivera nécessairement un jour où, faute de combustible, elle sera bien forcée de revenir au travail des autres agents naturels. Que les dépôts de houille et de pétrole lui fournissent longtemps encore leur énorme puissance calorifique, nous n'en doutons pas. Mais ces dépôts s'épuiseront sans aucun doute : le bois qui, lui, cependant, se renouvelle, n'est-il pas devenu plus rare qu'autrefois ? Pourquoi n'en serait-il pas de même un jour d'une provision de combustible où l'on puise si largement sans jamais combler les vides qui s'y forment ? Quand on pense à l'énorme consommation de houille qui se fait annuellement dans le monde, puisqu'en France, par exemple, il n'est pas de ligne importante de chemin de fer qui ne brûle plus de mille tonnes de charbon par jour, on ne peut s'empêcher de conclure qu'il est prudent et sage de ne pas s'endormir à cet égard dans une sécurité trompeuse.

Ainsi, dans un avenir lointain sans doute, mais qu'on essaie déjà de calculer, l'industrie ne trouvera plus en Europe les ressources qui sont en partie la cause de son essor prodigieux. Que fera-t-elle alors? S'en tiendra-t-elle au travail du vent, des cours d'eau, des moteurs animés, des machines chauffées au charbon de bois; ou sera-t-elle forcée, pour aller recueillir au loin les rayons du soleil, d'émigrer dans les régions qu'il dispute encore à ses envahissements? Les annales du genre humain, loin de rendre cette dernière éventualité douteuse, sont plutôt de nature à la faire pressentir; car elles semblent nous enseigner que les contrées qui ont nourri les grands peuples ont besoin, comme le sol après une abondante moisson, d'une période de repos.

Puisque les applications de la chaleur solaire n'offrent, selon toute vraisemblance, aucune chance sérieuse de succès dans nos climats, il n'y a pas lieu de répondre au reproche qu'on leur a fait d'exiger trop de place, et de ne pouvoir pour ce motif être mises à profit dans les grandes villes. Inutile de faire observer que ce reproche n'a plus de raison d'être quand il s'agit des vastes plaines de la zone torride, où ce qui manque le moins est l'espace utilisable, et que d'ailleurs les toits en terrasse des habitations dans les pays chauds se prêtent admirablement à l'emploi des rayons solaires sans perte de terrain utile. Verrait-on, par exemple, quelque inconvénient à installer la cuisine sur ces toits au lieu de la réléguer comme on le fait le plus souvent chez nous dans les caves ou les endroits obscurs?

Une des causes qui nuisent le plus au succès des applications nouvelles, c'est la tendance à s'exagérer l'importance des résultats obtenus et par suite à en tirer des

conclusions dont on ne se donne pas assez la peine de vérifier l'exactitude. En ce qui concerne les essais relatifs à l'emploi de la chaleur solaire, Ducarla n'est malheureusement pas le seul qui mérite un tel reproche. Buffon lui-même n'en est pas exempt, comme on peut en juger par ce passage de son mémoire sur les miroirs d'Archimède :

« Avec un assemblage de petits miroirs plans hexagones et d'acier poli, qui auraient plus de solidité, plus de durée que les glaces étamées, et qui ne seraient point sujets aux altérations que la lumière du soleil fait subir, à la longue, à l'étamage, on pourrait produire des effets très-utiles, et qui dédommageraient amplement des dépenses de construction du miroir.

« Pour toutes les évaporations des eaux salées, où l'on est obligé de consommer du bois et du charbon, ou d'employer l'art des bâtiments de graduation, qui coûtent beaucoup plus que la construction de plusieurs miroirs tels que je les suppose, il ne faudrait, pour l'évaporation des eaux salées, qu'un assemblage de douze miroirs plans d'un pied carré chacun; la chaleur qu'ils réfléchiront à leur foyer, quoique dirigée au-dessous de leur niveau, et à 15 ou 16 pieds de distance, sera encore assez grande pour faire bouillir l'eau et produire, par conséquent, une prompte évaporation; car la chaleur de l'eau bouillante n'est que triple de la chaleur du soleil d'été; et, comme la réflexion d'une surface plane bien polie ne diminue la chaleur que de moitié, il ne faudrait que six miroirs pour produire au foyer une chaleur égale à celle de l'eau bouillante. Mais j'en double le nombre, afin que la chaleur se communique plus vite, et aussi à cause de la perte occa-

sionnée par l'obliquité sous laquelle le faisceau de la lumière tombe sur la surface de l'eau qu'on veut évaporer, et encore parce que l'eau salée s'échauffe plus lentement que l'eau douce. Ce miroir, dont l'assemblage ne formerait qu'un carré de 4 pieds de largeur sur 3 de hauteur, serait aisé à manier et à transporter; et si l'on voulait en doubler ou tripler les effets dans le même temps, il vaudrait mieux faire plusieurs miroirs semblables, c'est-à-dire doubler ou tripler le nombre de ces mêmes miroirs de quatre pieds sur trois, que d'en augmenter l'étendue; car l'eau ne peut recevoir qu'un certain degré de chaleur déterminée, et l'on ne gagnerait presque rien à augmenter ce degré et, par conséquent, la grandeur du miroir; au lieu qu'en faisant deux foyers par deux miroirs égaux, on doublera l'effet de l'évaporation, et on le triplera par trois miroirs dont les foyers tomberont séparément les uns des autres sur la surface de l'eau qu'on veut faire évaporer. Au reste, l'on ne peut éviter la perte causée par l'obliquité, et, si l'on veut y remédier, ce ne peut être que par une autre perte encore plus grande, en recevant d'abord les rayons du soleil sur une grande glace qui les réfléchirait sur le miroir brisé, car alors il brûlerait en bas au lieu de brûler en haut; mais il perdrait moitié de la chaleur par la première réflexion, et moitié du reste par la seconde, en sorte qu'au lieu de six petits miroirs, il en faudrait douze pour obtenir une chaleur égale à celle de l'eau bouillante.

« Pour que l'évaporation se fasse avec plus de succès, il faudra diminuer l'épaisseur de l'eau autant qu'il sera possible. Une masse d'eau d'un pied d'épaisseur ne s'évaporera pas aussi vite, à beaucoup près, que la même

masse réduite à six pouces d'épaisseur et augmentée du double en superficie. D'ailleurs ce fond étant plus près de la surface, il s'échauffe plus promptement, et cette chaleur que reçoit le fond du vaisseau contribue encore à la célérité de l'évaporation. »

Nous avons reproduit tout au long ce passage où les erreurs de théorie se mêlent à des résultats numériques fort inexacts, pour montrer le danger des conclusions qui ne s'appuient pas assez sur l'expérience. Il est probable que s'il eut essayé d'appliquer son appareil à l'évaporation de l'eau de mer, Buffon n'eût pas écrit ce qu'on vient de lire. Nous avons eu déjà trop de fois l'occasion de montrer que les phénomènes qui se produisent à une température donnée sont loin d'exiger tous la même somme de chaleur, pour avoir encore à établir que si « la chaleur de l'eau bouillante n'est que triple de celle du soleil d'été, » on ne saurait en conclure la possibité de réduire rapidement le liquide en vapeur par l'effet de la concentration des rayons solaires. Cette fausse manière de voir fait tomber Buffon dans une autre erreur : car, de ce que le point d'ébullition de l'eau de mer reste à peu près fixe, il en conclut qu'un miroir d'une étendue double ne vaporiserait pas, toutes choses égales d'ailleurs, un poids double de liquide, ce qu'on sait ne pas être. Loin de nous, d'ailleurs, la pensée de faire un reproche à Buffon de toutes ces inexactitudes : elles sont trop excusables à une époque où les progrès de la physique étaient encore si peu marqués, pour que notre unique but ne soit pas de montrer que les vues du grand naturaliste, relativement à la vaporisation de l'eau par les rayons du soleil, ne reposaient que bien imparfaitement sur l'expérience. Ajoutons aussi que Buffon propose encore

d'utiliser la chaleur solaire pour calciner le gypse, la pierre à chaux, pour volatiliser l'or, l'argent, etc., et qu'il se montre cette fois plus circonspect, puisqu'il exprime avec raison la crainte que des corps assez volumineux, placés au foyer de son miroir, n'éprouvent dans l'air un refroidissement trop rapide.

Comme rien de ce qui peut hâter le progrès des applications de la chaleur solaire ne nous semble indifférent, nous signalerons encore une sorte de malentendu qui pourrait laisser subsister contre elles quelques préventions défavorables.

Généralement, on donne assez volontiers le nom de marmite solaire aux appareils de de Saussure, de Ducarla, de sir John Herschel; or, cette dénomination n'est pas seulement inexacte, à notre avis, elle est encore de nature à égarer l'opinion, bien plus qu'à l'éclairer, sur l'avenir d'une partie des essais qui font l'objet de cet ouvrage. Car, enfin, il est naturel d'entendre par ce mot de marmite solaire une espèce de chaudière pouvant, dans un espace étroit, faire bouillir et même vaporiser assez vite au soleil un volume d'eau d'un ou deux litres au moins, c'est-à-dire un appareil capable de résoudre l'un des problèmes les plus difficiles que puisse offrir la branche d'applications qui nous occupe. Mais si cet appareil existe depuis longtemps déjà, comment s'expliquer l'indifférence avec laquelle on l'aurait accueilli dans les pays chauds, et que penser des essais de ce genre, sinon qu'ils ne sont pas faits pour entrer dans le domaine de l'industrie ? A ces questions la réponse est heureusement facile : c'est que jamais, avant ces dernières années, le problème dont il s'agit n'a été résolu ni d'une manière pratique, ni même par concentration

dans une enceinte vitrée, du moins à notre connaissance. Avons-nous besoin de rappeler, en effet, que de Saussure n'a pas même essayé sur les Alpes de faire bouillir l'eau dans son héliothermomètre ; que Ducarla, moins réservé dans ses assertions, ne les appuie sur aucune expérience, et qu'enfin la cuisson de la viande dans le petit four de campagne de sir John Herschel était loin d'exiger la même somme de chaleur que la vaporisation d'un égal poids d'eau? Aucun de ces appareils d'ailleurs ne pouvait ainsi, que nous l'avons fait voir, donner une solution satisfaisante du problème. Si, d'un autre côté, Tchirnhausen parvint à faire bouillir de l'eau dans un vase de terre placé au foyer de son grand miroir sphérique, les détails de l'expérience prouvent que le volume du liquide était peu considérable, comme il convient dans les essais au miroir ardent ; au reste ce grand physicien songeait si peu à tirer de là quelque application pratique qu'il renonça bientôt même à l'emploi des réflecteurs pour ne s'occuper que des effets curieux produits par les lentilles. Donc, avant nos essais, le problème de la vaporisation de l'eau par l'effet des rayons solaires n'avait pas encore reçu de solution pratique. Inutile d'ajouter que si nous insistons sur ce point, c'est uniquement parce qu'il importe de mettre dans tout son jour un fait qui intéresse à un si haut degré l'avenir de certaines contrées.

Quant aux appareils qui nous ont servi pour obtenir ces résultats décisifs, loin de les croire parfaits, nous sommes les premiers à reconnaître qu'il est possible de les modifier avantageusement sous tous les rapports, et nous ne doutons pas que l'industrie ne parvienne, une fois leur utilité reconnue, non-seulement à leur donner une forme

plus commode, mais encore à les livrer à bas prix.

Ainsi, pour n'en citer qu'un seul exemple, la marmite solaire de la figure 19, bien qu'étant assez simple, peut néanmoins recevoir la disposition suivante qui semble devoir être plus avantageuse :

Un miroir sphérique de médiocre étendue est fixé par



Fig. 35.

un genou à coquilles à l'une des branches du support qui doit soutenir la chaudière. Ce miroir peut donc être facilement dirigé vers le soleil et maintenu dans une position qui lui permette de recevoir d'a plomb la chaleur incidente. A l'autre branche du support est fixée par une vis une tige mobile qui supporte la chaudière et permet de l'installer au foyer même du miroir. Quant à la chaudière elle-même, elle est formée d'un vase de verre ou de cristal

surmonté de son couvercle et d'un autre vase noirci à l'extérieur et dont les bords reposent sur ceux du premier.

Comme on voit, les principaux avantages de cette disposition sont : premièrement, de faciliter l'orientation de l'appareil, qui pourra servir, ainsi modifié, dans tous les climats, et, en second lieu, de donner une forme plus convenable au miroir qui, n'ayant plus besoin d'offrir autant de surface qu'un réflecteur cylindrique, coûtera nécessairement moins cher. Nous n'avons pas besoin de rappeler d'ailleurs que, si dans nos essais, nous nous sommes servi de miroirs en plaqué d'argent, c'était en vue d'obtenir les meilleurs résultats possibles, mais que dans la pratique on pourra sans inconvénient recourir à l'emploi d'un métal moins précieux : car nous avons même constaté déjà qu'un réflecteur cylindro-parabolique en laiton mal poli, d'un demi-mètre carré d'ouverture, suffisait pour produire une ébullition très-vive dans un volume d'eau de cinq litres.

Il ne nous reste plus maintenant qu'à faire connaître, en peu de mots, d'après les renseignements qui nous sont parvenus à ce sujet, quelques-unes des applications probables de la chaleur solaire dans les régions intertropicales.

Inutile d'insister d'abord sur les avantages que présente l'emploi direct de cette source calorifique au point de vue de la cuisson des viandes, des légumes et du pain. Ces avantages sont trop évidents quand il s'agit des pays favorisés du soleil où le combustible fait défaut. Disons seulement que quelques appareils, peut-être trop oubliés de nos jours, tels que le caléfacteur de Lemarre, n'exigeraient que bien peu de modifications pour cuire les aliments au

soleil aussi bien qu'avec le charbon. Les réflecteurs eux-mêmes pourraient être formés de petits miroirs plans, s'ouvrir et se fermer comme un éventail ; rien n'empêcherait d'ailleurs de disposer à cet effet l'intérieur d'un caisson pour une expédition dans le désert. En un mot, il semble possible de procurer sans trop de frais à nos soldats d'Afrique une petite batterie de cuisine, simple, portative, et qui n'exigeant pas de combustible pour la cuisson des aliments pourrait leur être d'un grand secours dans les sables du Sahara aussi bien que dans les neiges de l'Atlas.

Aux besoins de l'alimentation viennent souvent s'en ajouter d'autres que l'hygiène impose sous un ciel torride. C'est ainsi que, dans notre colonie de Cochinchine, à Saïgon par exemple, l'eau doit être soumise à l'ébullition pour devenir potable. Quelle économie de combustible ne réaliserait-on pas en utilisant pour cet objet l'ardente chaleur du climat ? Le filtrage des eaux ne laisse pas non plus que d'être fort utile dans la plupart des régions équatoriales ; mais la pompe solaire de Salomon de Caus se transformerait sans peine en un filtre automoteur s'emplissant la nuit et versant le jour une eau limpide. Le même appareil servirait encore à rafraîchir l'air durant les moments les plus chauds de la journée en alimentant des jets d'eau dans les appartements. Enfin, il n'est pas jusqu'à l'appareil Carré qui ne puisse fonctionner au soleil, puisqu'on n'y porte jamais la dissolution d'ammoniac à plus de 150 degrés. Ainsi, malgré ce qu'une pareille assertion présente au premier abord de paradoxal, il est possible d'utiliser les rayons solaires même pour produire la glace si nécessaire aux habitants des pays chauds !

La conservation des aliments, des boissons et des grains forme une autre branche d'industrie où l'emploi direct de la chaleur solaire est appelé à rendre d'utiles services.

Si, par exemple, l'un des procédés les plus rationnels de conservation des grains, l'étuvage entre 50 et 70 degrés pour détruire les insectes et leurs œufs tout en laissant au blé sa faculté germinative, n'a pas mieux réussi jusqu'à ce jour, c'est qu'il est très-difficile avec le combustible ordinaire de maintenir entre de pareilles limites la température de l'étuve. Mais en serait-il de même de l'échauffement au soleil d'un grand silo métallique protégé par une enceinte vitrée et susceptible de tourner sur lui-même? Tout porte à croire que là serait au contraire la solution la plus simple et la moins couteuse du problème.

Le chauffage des vins au bain-marie ne devant avoir lieu qu'entre 40° et 70° serait encore un effet de l'insolation facile à réaliser. Enfin, comment ne pas augurer favorablement de l'emploi de la chaleur solaire pour la conservation des viandes, des légumes et des fruits, si l'on observe que cette branche d'application récente n'exige guère que l'ébullition de l'eau naturelle ou salée, et que d'ailleurs les pays où elle est surtout appelée à prospérer sont précisément ceux que le soleil favorise le plus.

Il est une foule d'industries que l'usage des récepteurs solaires serait de nature à propager dans les pays chauds où elles n'ont pu se développer jusqu'à présent faute de combustible. Telles sont, par exemple, celles qui ne demandant pas un degré de chaleur fort élevé, ont pour but d'utiliser les débris organiques, de préparer la gélatine, la colle-forte, de fondre les graisses; de fabriquer la bougie, les savons,... etc. Qu'on n'aille pas croire au surplus que

les générateurs solaires excluent l'emploi simultané du combustible, et ne permettent par conséquent ni de produire des effets calorifiques intenses, ni de prolonger jusqu'au lendemain une opération commencée pendant le jour. Rien n'empêche, en effet, de combiner ces appareils avec le mode de chauffage ordinaire. Quoi de plus facile, par exemple, que de munir d'une cheminée et de chauffer intérieurement avec du bois ou de la houille une chaudière annulaire dont la surface extérieure seule éprouverait les effets de l'insolation ? Il semble même qu'on puisse obtenir de la sorte au soleil, sans aucune dépense de combustible, des résultats exigeant la production d'une température élevée, tels que la fabrication du noir animal et du charbon de bois en vase clos. Personne n'ignore, en effet, que les gaz inflammables qui se dégagent en pareil cas des os ou du bois finissent par fournir en brûlant la chaleur nécessaire à l'opération, en sorte qu'on n'a guère besoin d'allumer le feu que pour mettre cette dernière en train. Or, les rayons solaires ne suffiraient-ils pas ici pour amener le dégagement des gaz inflammables ? L'expérience seule peut donner la réponse à cette question.

S'il est permis de fonder de grandes espérances sur l'adoption des récepteurs solaires dans les colonies, c'est particulièrement pour la distillation des alcools et des essences, et pour l'évaporation des liqueurs salines ou sucrées. Il n'est donc pas inutile d'entrer dans quelques détails à ce sujet.

La distillation des matières alcooliques n'a pas seulement pour but d'extraire l'alcool du vin, des mélasses, des grains ou de la fécule ; elle fournit encore des résidus qui servent soit à la nourriture du bétail soit comme engrais.

On ne peut trop souhaiter par conséquent de voir les distilleries agricoles se propager dans le midi et devenir aussi nombreuses que dans l'Allemagne du Nord, par exemple, où il n'est pas de ferme importante qui ne possède un alambic. Il est à présumer d'ailleurs que l'emploi direct des rayons solaires ne contribuera pas médiocrement à ce progrès, puisqu'un réflecteur cylindrique d'un demi-mètre carré d'ouverture suffit, comme on l'a vu, pour distiller rapidement quelques litres de vin, et qu'en outre le liquide, à cause de la régularité avec laquelle il s'échauffe, transmet à l'eau-de-vie son arôme sans lui communiquer de mauvais goût. Ajoutons que tous les appareils de distillation, depuis les plus simples, tels que l'érorateur Kessler, jusqu'aux alambics à distillation continue généralement adoptés dans le midi, sont susceptibles de fonctionner économiquement au soleil, car le seul changement qu'ils exigent en pareil cas est la transformation de la chaudière en un générateur solaire d'une étendue convenable. Nous en dirons autant des alambics employés pour l'extraction des huiles essentielles : ils se prêteront même d'autant mieux à la modification dont il s'agit, qu'ils ont besoin d'une grande surface de chauffe pour donner des résultats satisfaisants. Enfin, dans les petites distilleries nomades qui parcourent les montagnes de la Provence, les appareils solaires rendront d'autant plus de services que l'ardeur du soleil augmente, comme on sait, à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère.

Depuis le siècle dernier, les procédés d'extraction du sel se sont notablement perfectionnés en même temps que s'est accrue l'importance de cet objet de consommation. Néanmoins, il semble qu'il y ait encore de grands progrès

à réaliser, grâce à la concentration des rayons solaires, dans une branche d'industrie qui a su tirer si bien parti de cette source calorifique. C'est, en effet, principalement à cause de l'insolation que les marais salants peuvent fournir les 1,000 kil. de sel au prix minime de 6 fr. à 25 fr. suivant les localités et l'état de l'atmosphère, tandis que l'évaporation produite dans cette circonstance coûterait 234 fr. avec de la houille à 30 fr. la tonne. Mais, comme la seconde opération serait beaucoup plus rapide que la première, il reste à savoir s'il n'est pas possible de trouver un moyen terme entre ces deux extrêmes, et si l'emploi des récepteurs solaires ne permettrait pas d'extraire le sel de l'eau de mer très-rapidement et à peu de frais : c'est donc une expérience à tenter. On sait aussi qu'une surface d'un mètre carré de fagots dans les bâtiments de graduation donne en 12 heures une évaporation de 30 kil. d'eau, ce qui répond à une consommation de 22 calories par minute. Un réflecteur de deux mètres carrés recueillant dans les pays chauds au moins 30 calories par minute pourrait donc rendre les mêmes services; mais, quelle économie dans la substitution d'un appareil solaire aux bâtiments de graduation ainsi qu'à l'attirail de leurs pompes mues par des roues hydrauliques ! Il y a plus, l'emploi direct de la chaleur solaire supprimerait la dépense nécessaire pour extraire le sel des liqueurs concentrées, puisque, dût-on n'opérer à la fois que sur des masses liquides peu considérables, comme cela se pratique dans l'Avranchin, rien n'empêcherait d'effectuer le schlotage et le salinage au soleil. C'est encore là par conséquent une question à étudier

Parmi les industries qui semblent spécialement appelées à profiter des applications de la chaleur solaire, n'oublions

pas de citer la fabrication du sucre de cannes ; car, les sucreries coloniales auront par là le moyen non-seulement de suppléer au combustible, mais encore de perfectionner leurs procédés d'extraction qui seraient, à ce qu'il semble, assez défectueux. S'il est vrai, par exemple, qu'après avoir obtenu par écrasement le vesou, c'est-à-dire le suc de la canne, on ne prenne pas la précaution de l'évaporer à une température moindre que 100°, pour éviter autant que possible la formation des mélasses, et qu'on le fasse rapidement bouillir à l'air libre en brûlant à cet effet les bagasses ou débris de cannes qui contiennent encore 25 ou 30 pour cent de sucre, on ne saurait nier l'économie que procurerait l'introduction d'un récepteur solaire dans les opérations de ce genre, puisqu'elle permettrait à la fois d'éviter la perte des bagasses et de régler convenablement l'évaporation du vesou. Disons de plus que, pour le raffinage du sucre, la concentration des rayons solaires serait encore d'un utile secours, et que rien ne prouve au reste qu'on ne puisse appliquer ce mode de chauffage économique même aux grands appareils perfectionnés, tels que les chaudières à cuire dans le vide, qui depuis quelque temps commencent à se répandre dans les colonies.

On le voit donc, il n'est peut-être pas d'industrie nécessitant de vastes réservoirs d'eau chaude, une évaporation rapide, des distillations régulières opérées sur une grande échelle, qui ne doive attendre du soleil, dans les régions intertropicales, des services signalés. Qui sait même si, comme le proposait Buffon, il ne serait pas possible d'employer cette source de chaleur à calciner le gypse, la pierre à chaux, à réduire certains minerais, etc. ? Car l'écueil redouté du grand naturaliste dans les essais

de ce genre était le refroidissement à l'air libre des corps placés au foyer de son miroir. Mais il est facile, comme on l'a vu, d'éviter cet écueil en plaçant les matières à calciner sous une cage de verre, ou mieux dans un réservoir métallique noirci protégé par cette cage. C'est ainsi, par exemple, qu'on pourrait procéder pour l'extraction du soufre, pour son épuration, pour la préparation de l'acide sulfurique et autres opérations semblables. Remarquons aussi qu'en installant un creuset réfractaire muni d'une cloison vitrée au foyer d'un grand miroir sphérique, à peu près comme le montre la figure 35, on obtiendrait sans peine au soleil la fusion de la plupart des métaux, sinon de tous, ce qui pourrait être d'une grande utilité dans les pays où le combustible manque. Mais il serait superflu d'entrer dans de plus longs détails à cet égard. Achevons donc notre tâche en disant quelques mots des applications mécaniques de la chaleur solaire.

Il est une question qui, dans les pays favorisés du soleil, l'emporte sur toutes les autres par son importance, c'est celle de l'aménagement des eaux pour conserver aux terres le degré d'humidité qui leur convient. Aussi, dès la plus haute antiquité les peuples agriculteurs ont-ils accompli de grands travaux sous ce rapport ; et si les moyens mécaniques dont ils pouvaient disposer ne leur ont pas toujours permis de dessécher les terrains marécageux, afin de les rendre à la culture, et de tarir dans leur source les émanations pestilentielles, ils ont su du moins, comme nous l'apprend si bien M. Barral, procéder sur une vaste échelle à l'arrosement des terres.

« Un grand nombre de réservoirs, dit le savant agronome, étaient distribués le long du cours supérieur du

Nil. L'Inde, la Perse, l'Assyrie, la Palestine, la Chine, l'Arabie présentent des restes admirables d'immenses travaux accomplis pour recueillir les eaux et les répartir en arrosages destinés à fertiliser le sol où florissaient les plus antiques civilisations. Qui ne connaît les noms du lac Mœris, des réservoirs de Memphis, de Méroë, de Cophtos, d'Hermontis? Des centaines de millions de mètres cubes étaient emprisonnés dans des bassins qui occupaient des vallées entières et qui étaient reliés par des canaux se ramifiant en mille artères pour porter en tous sens la fécondité. » Malheureusement à ce tableau de l'ancienne puissance des populations de l'Orient, M. Barral est bien forcé d'opposer le contraste de leur décadence actuelle et d'ajouter : « Ces monuments merveilleux, de la plus haute utilité publique, légués à la postérité, servent encore à entretenir la vie dans des régions où la barbarie semble avoir posé le pied pour bien des siècles encore, si la vapeur, l'électricité, les chemins de fer, de nouvelles découvertes plus étonnantes peut-être que nous réserve l'avenir, ne donnent pas aux peuples d'Occident la puissance de vaincre l'apathie et l'inertie des peuples d'Orient. »

Hâtons-nous de rappeler cependant que, selon toute probabilité, le mal signalé par M. Barral n'est pas tellement grave qu'on doive en chercher bien loin le remède. Comme nous l'avons déjà dit, ce qui manque à des contrées, autrefois si prospères, pour sortir de leurs ruines, ce n'est pas seulement de la force, c'est avant tout de la force à bas prix. Les bras suffiraient, à la rigueur, pour cette œuvre de régénération, s'ils étaient plus nombreux; malheureusement ils font partout défaut. Que reste-t-il donc? Le soleil! c'est-à-dire un puissant foyer tout prêt à

fournir sa chaleur par les applications mécaniques. Avons-nous besoin d'insister, d'ailleurs, sur la simplicité du récepteur solaire que nous proposons? Une chaudière à vapeur ordinaire, une enceinte vitrée pour la protéger contre le refroidissement, un réflecteur métallique pour y concentrer les rayons du soleil, tel est l'appareil dans son ensemble. Le calcul fixe, en moyenne, à 8 mètres carrés l'étendue de la surface réfléchissante pour une machine d'un cheval. Doublons ce nombre, afin de tenir compte, en les exagérant, des pertes de chaleur, et nous arrivons à 16 mètres carrés, c'est-à-dire à la cinquième partie de la surface totale des ailes d'un moulin à vent. Il est très-probable, au reste, que 9 ou 10 mètres carrés suffiront : dans ce cas, le prix du réflecteur en plaqué d'argent serait de neuf cents à mille francs.

Ainsi tout porte à croire qu'il est possible d'installer, dans certains pays, sur les bords des cours d'eau, des appareils hydrauliques n'ayant besoin pour fonctionner à la vapeur ni de combustible ni d'une grande surface d'insolation. Qu'on réfléchisse un instant aux avantages qui peuvent résulter pour l'Ègypte, par exemple, d'une pareille innovation, et l'on conviendra facilement qu'elle vaut au moins la peine d'être tentée. Au lieu des pauvres fellahs à demi plongés dans le Nil, dont ils puisent l'eau sous un soleil ardent pour la répandre dans les terres, au lieu des norias primitives mues par les chevaux ou les bœufs, des machines à vapeur, convenablement espacées sur les bords du fleuve, pourvoieraient en grande abondance à l'arrosage, et permettraient ainsi de rendre à l'agriculture des forces capables d'y trouver un meilleur emploi. Qu'on ne s'y trompe pas d'ailleurs, les moteurs

solaires n'auraient pas uniquement pour objet de rivaliser avec les anciens travaux d'irrigation du pays; leur sphère d'activité n'ayant pas d'autres bornes que celles des applications mécaniques de la chaleur, ils entraîneraient à leur suite la légion des machines industrielles ou agricoles. En un mot, les applications mécaniques de la chaleur solaire occasionneraient peut-être dans les pays chauds une révolution complète; et qui pourrait prévoir les conséquences de l'impression profondes qu'elles ne manqueraient pas de produire sur l'esprit des populations indigènes? On se rappelle avec quels transports d'enthousiasme les Arabes saluaient, il y a peu d'années, l'inauguration des puits artésiens dans le Sahara, que diraient-ils donc en voyant l'industrie s'installer dans leurs déserts avec tout l'arsenal de ses pacifiques moyens de conquête?

Il n'a été question jusqu'ici que de la machine à vapeur; mais les considérations qui précèdent peuvent évidemment s'appliquer aux nouveaux moteurs de MM. Frot, Laubereau, etc. Rappelons même que le but de ces appareils étant de transformer aussi complétement que possible la chaleur en travail, le succès ne saurait en être que favorable à l'emploi mécanique des rayons du soleil. Au reste rien ne prouve que la machine à vapeur ne soit pas également susceptible de notables perfectionnements. Nous ne pouvons même nous empêcher de faire à ce propos une dernière remarque. Il semble que le rendement de la machine à vapeur solaire doive s'accroître à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère, puisqu'alors le point d'ébullition des liquides s'abaisse en même temps que l'ardeur du soleil augmente et que le refroidissement de l'air favorise la condensation des vapeurs. Qui sait, par

conséquent, si les aéronautes ne devront pas un jour à toutes ces circonstances réunies la solution du problème qu'ils affrontent avec tant de persévérance et de courage?

Mais c'est assez insister sur de pareilles vues. Mieux que des conjectures ou même que des considérations théoriques, nous avons apporté des faits à l'appui de la cause que nous essayons de plaider dans cet ouvrage, et nous croyons que ces faits sont de nature à intéresser l'industrie. Nous ne doutons pas, d'ailleurs, que des essais aussi nouveaux ne soulèvent contre eux beaucoup d'objections. Mais quelle est l'innovation sérieuse qui n'a pas rencontré, dès le début, des résistances à vaincre ou des préventions à combattre? Et combien de fois n'a-t-on pas vu l'expérience écarter brusquement les objections les plus spécieuses pour frayer au progrès des chemins réputés impossibles? C'est donc à l'expérience que nous en appellerons constamment, puisque, aussi bien, en matière d'applications usuelles, il n'appartient qu'à elle seule de prononcer en dernier ressort.

FIN.

TABLE DES SOMMAIRES

CHAPITRE PREMIER.

CHAPITRE II.

CHAPITRE III.

CHAPITRE IV.

CHAPITRE V.

CHAPITRE VI.

CHAPITRE VII.

CHAPITRE VIII.



Tours. — Imprimerie MAZEREAU.

